



**Américo Henriques
Dias** **Optimização da Secagem de Produtos Agro-
alimentares**



**Américo Henriques
Dias**

**Optimização da Secagem de Produtos Agro-
alimentares**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Fernando José Neto Da Silva, Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos pelo incansável apoio.

o júri

presidente

Prof. Doutora Mónica Oliveira

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

orientador

Professor Doutor Fernando José Neto Da Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço à minha família pelo apoio que me deram nestes anos de estudo.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Fernando José Neto Da Silva pela disponibilidade e acima de tudo por ter ajudado em tudo o que podia.

Ao Sr. João Teles pela disponibilidade e simpatia para resolver qualquer problema na Estação de Secagem.

Ao Carlos Carvalho pelas dicas dadas sobre a Estação de Secagem.

Aos professores André Quintã e Jorge Ferreira pelas dicas que me ajudaram a resolver os problemas existentes na estação de secagem.

Ao professor António Ramos pela explicação do funcionamento da Câmara Higrométrica.

Ao professor Francisco Melo pela disponibilidade e ajuda nas pesquisas para a tese.

Ao Rui Faria pela disponibilidade que teve quando eu precisava de me movimentar para locais mais distantes.

Ao Sr. Secretário-geral Eng. Paulo Mónica, por me ter recebido na Associação Industrial de Bacalhau e me ter respondido às perguntas relacionadas com a indústria do bacalhau.

À empresa João dos Santos Pires, SA na Gafanha da Nazaré, que disponibilizou a matéria-prima (bacalhau).

Ao meu colega João pela ajuda dada sobre funções do Matlab®.

palavras-chave

Secagem natural, secagem artificial, bacalhau, temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), humidade relativa do ar (%), velocidade do ar (m/s), humidade de equilíbrio, cinética da secagem.

Resumo

Com o presente trabalho pretende-se fazer um estudo sobre a cinética da secagem do bacalhau nomeadamente no que se refere à determinação das humidades de equilíbrio e ao estudo da cinética da secagem.

A determinação das humidades de equilíbrio foi conseguida usando uma câmara higrométrica existente no Departamento de Engenharia Mecânica, onde foram variados os parâmetros de secagem, temperatura e humidade relativa.

A cinética da secagem do bacalhau foi determinada com recurso a uma estação de secagem existente no Departamento de Engenharia Mecânica. Foram obtidas as curvas de secagem em várias condições de secagem. Nas experiências realizadas na estação de secagem, foram variadas a humidade relativa (40,50 e 60%), a velocidade do ar (1.5m/s e 3m/s) e manteve-se constante a temperatura (20°C).

Após o tratamento e discussão dos resultados verificou-se que a um aumento da temperatura provoca uma diminuição no valor da humidade de equilíbrio e um aumento da humidade relativa provoca um aumento da humidade de equilíbrio. Na estação de secagem verificou-se que um aumento da velocidade de secagem provoca uma diminuição do tempo de secagem e um aumento da humidade relativa provoca um aumento do tempo de secagem.

keywords

Natural drying, artificial drying, cod, air temperature (°C), relative humidity (%), air velocity (m/s) and humidity of balance, the kinetics of drying cod.

abstract

With this work we intend to do a study on the drying kinetics of salted cod. Namely in what determination of concerns the drying equilibrium drying kinetics.

In order to determine the moisture drying equilibrium an hygrometric chamber was used.

A convective drying station was used to study the drying kinetics of salted cod. In the experiments carried out on the drying station relative humidity and air speed was varied while temperature remained constant (20°C).

After treatment and discussion of the results has shown that an increase in temperature causes a decrease in the amount of humidity equilibrium while the effect was varied when relative humidity was increase. Drying kinetics is accelerated by an increase in the air velocity and reduced by an increase in the relative humidity.



Índice

Índice.....	1
Índice das figuras	4
Índice das tabelas	5
1. Introdução	6
2. Objectivos	6
3. Enquadramento	7
3.1. A Indústria do Processamento do Bacalhau Salgado Verde em Portugal.....	7
3.1.1. Matéria-Prima.....	7
3.1.2. Processamento do Bacalhau	11
3.1.3. Operações de Secagem do Bacalhau	13
3.1.4. Indústria de processamento do Bacalhau	17
3.1.5. Caracterização de uma Estufa	18
3.1.6. Regras para o Comércio do Bacalhau.....	19
3.2. Revisão Bibliográfica.....	20
3.3. Cinética da Secagem do Bacalhau	21
4. Metodologia Experimental	25
4.1. Selecção da matéria-prima	25
4.2. Equipamentos	26
4.2.1. Determinação das humidades inicial e final.....	26
4.2.2. Determinação das humidades de equilíbrio	26
4.2.3. Determinação da massa das amostras.....	27
4.2.4. Determinação das curvas de secagem.....	27
4.3. Planificação das Experiências e da Análise dos Resultados	34
4.3.1. Método de Taguchi.....	34
4.3.2. Planificação Experimental	36
4.3.3. Planificação das experiências segundo o Método de Taguchi	37



4.4.	Preparação das amostras para a determinação da humidade de equilíbrio	37
4.4.1.	Preparação das amostras para a obtenção da humidade de equilíbrio	37
4.4.2.	Execução das experiências	39
4.5.	Preparação das amostras para a determinação da cinética de secagem	39
4.5.1.	Preparação das amostras para a obtenção da humidade inicial e final	39
4.5.2.	Execução das experiências	40
4.6.	Cálculo do teor de água inicial e final das amostras	40
4.7.	Parâmetros Experimentais	41
4.7.1.	Na Câmara Higrométrica	41
4.7.2.	Na Estação de Secagem	42
5.	Resultados	43
5.1.	Humidades de Equilíbrio	43
5.2.	Cinética da secagem	47
5.2.1.	Curvas de Secagem	47
5.2.2.	Gráfico Adimensional	49
5.2.3.	Taxa de secagem	51
5.2.4.	Teor de humidade	52
6.	Discussão e Conclusões	55
6.1.	Análise da cinética da secagem	55
6.1.1.	Primeira análise: tempo para a obtenção de um valor de % base húmida igual ou inferior a 47%	55
6.1.2.	Segunda análise: valor da taxa média de secagem para o intervalo de 0 a 72 horas	57
6.2.	Análise da humidade de equilíbrio	59
7.	Sugestões para futuros trabalhos	61
	Referências	62
	Anexos	64



Anexo 1 - Especificações técnicas dos equipamentos usados.....	65
Anexo 2 – Representação da variação da humidade relativa em função do tempo de secagem	67



Índice das figuras

Figura 3.1: Zonas de cardumes de bacalhau	8
Figura 3.2: Peixe Gadus Morhua	8
Figura 3.3: Ovas e seu processamento	10
Figura 3.4: Fases do processo produtivo do bacalhau	11
Figura 3.5: Processo de escala	11
Figura 3.6: Salga do bacalhau em fardos	12
Figura 3.7: Secagem natural do bacalhau	13
Figura 3.8: Entrada de uma estufa de secagem de bacalhau	16
Figura 3.9: Visualização do interior de uma estufa	18
Figura 3.10: Esquema de uma estufa de secagem de bacalhau	19
Figura 3.11: Esquema de migração da água do bacalhau para a superfície	22
Figura 3.12: Curvas típicas da velocidade, humidade e temperatura no produto, durante a secagem	22
Figura 3.13: Processo de secagem onde se atinge o ponto de equilíbrio	24
Figura 4.1: Amostras de Bacalhau e corte das amostras	25
Figura 4.2: Estufa	26
Figura 4.3: Câmara Higrométrica TCC 4034 e respectivo painel de controlo	27
Figura 4.4: Balança digital Avery Berkel	27
Figura 4.5: Estação de secagem A575	28
Figura 4.6: Ventilador de velocidade variável	28
Figura 4.7: Caldeira	29
Figura 4.8: Resistências de 1kW	29
Figura 4.9: Compressor	30
Figura 4.10: Resistências de 0.5kW	30
Figura 4.11: Painel de controlo dos diversos elementos da unidade A575	31
Figura 4.12: Termo-higrómetro digital	32
Figura 4.13: Micromanómetro	32
Figura 4.14: Sensor de temperatura LM35	33
Figura 4.15: Menu de introdução de dados	34
Figura 4.16: Amostra para secagem	37



Figura 4.17: Amostras com formato de um cubo e de uma esfera	38
Figura 4.18: Amostra para determinação da humidade inicial.....	38
Figura 5.1: Comparação da humidade de equilíbrio das experiências I-III	45
Figura 5.2: Comparação da humidade de equilíbrio entre formas geométricas	46
Figura 5.3: Curvas de secagem de todas as experiências.....	48
Figura 5.4: Massa adimensional de todas as experiências	50
Figura 5.5: Teor de humidade de todas as experiências	54

Índice das tabelas

Tabela 4.1: Matriz L_4 de Taguchi	36
Tabela 4.2: Condições de secagem na câmara higrométrica.....	42
Tabela 4.3: Condições experimentais de secagem na estação de secagem A575	42
Tabela 5.1: Humidades de Equilíbrio na câmara higrométrica das exp. I-III	43
Tabela 5.2: Humidades de Equilíbrio na câmara higrométrica entre geometrias.....	43
Tabela 5.3: Tempos relativos à perda de massa inicial de 5%,10%,15%,20% e 25% para cada amostra	52
Tabela 6.1: Tabela da disposição das experiências.....	55
Tabela 6.2: Disposição ortogonal $L_4 (2^3)$ pelo método de Taguchi para a 1ª análise.....	56
Tabela 6.3: Tabela de respostas	57
Tabela 6.4: Disposição ortogonal $L_4 (2^3)$ pelo método de Taguchi para a 2ª análise.....	57
Tabela 6.5: Tabela de respostas	58

1. Introdução

Desde tempos remotos que a conservação de peixe e carne é assegurada, entre outros métodos, por técnicas que ainda hoje se praticam como a secagem e defumação.

O aumento do consumo de bacalhau levou a uma melhoria da produtividade na indústria do processamento de bacalhau de modo a dar resposta ao mercado consumidor. As indústrias de secagem de bacalhau passaram a usar o método de secagem com ar forçado, designado de secagem artificial de modo a responder ao aumento do consumo de bacalhau.

A secagem artificial diferencia-se da secagem natural pelo acréscimo dos consumos energéticos a ela associados. Deste ponto de vista, a optimização da secagem é um objectivo a assegurar uma vez que a energia assume um papel significativo na estrutura de custos na indústria do processamento do bacalhau.

O presente trabalho pretende analisar o método de secagem artificial, de modo a verificar quais as características com maior relevância na secagem do produto.

2. Objectivos

Os objectivos a assegurar com a realização deste trabalho são:

- Análise das etapas do processamento do bacalhau desde que é descarregado nos portos até sair para o mercado.
- Caracterização da importância económica da indústria do processamento do bacalhau;
- Inventariação dos principais resultados até agora obtidos sobre a secagem de bacalhau;
- Investigação da cinética da secagem do bacalhau de modo a compreender as operações de secagem do bacalhau;
- Caracterização dos equipamentos utilizados para a determinação das humidades de equilíbrio e das curvas de secagem;



- Determinação das humidades de equilíbrio usufruindo em função da humidade relativa e da temperatura do ar;
- Estudo da cinética da secagem através de experiências realizadas numa estação de secagem;
- Análise dos resultados;
- Estudo da importância dos parâmetros de secagem (humidade relativa do ar e velocidade do ar) através do Método de Taguchi;
- Formulação de propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

3. Enquadramento

3.1. A Indústria do Processamento do Bacalhau Salgado Verde em Portugal

3.1.1. Matéria-Prima

A actividade piscatória e a indústria da transformação do pescado têm uma grande importância para Portugal, em especial para as comunidades ribeirinhas. Em 1991 (dados do último Censo da População realizado pelo Instituto Nacional de Estatística - INE) o emprego no sector rondava 1% da população activa” [1].

Os pescadores portugueses capturam aproximadamente 2800 ton de peixe vivo equivalente a 933 ton de peixe seco. Este valor representa cerca de 1 a 2% do consumo nacional de bacalhau [2].

De uma forma geral as indústrias portuguesas importam bacalhau verde para processamento (secagem e embalagem) e posterior comercialização. A quantidade de bacalhau verde importado por Portugal é de 1160 toneladas por mês correspondentes a 5,83 milhões de euros por mês [3].

Em 2004 Portugal foi o país que consumiu mais peixe, sendo o consumo médio anual de 60 kg/habitante. Desse consumo médio, metade do peixe consumido é bacalhau [4].

As zonas de captura do bacalhau são o Mar do Norte, Ártico-Norueguês, ilhas Faroe, Islândia, Gronelândia e Labrador (figura 3.1).

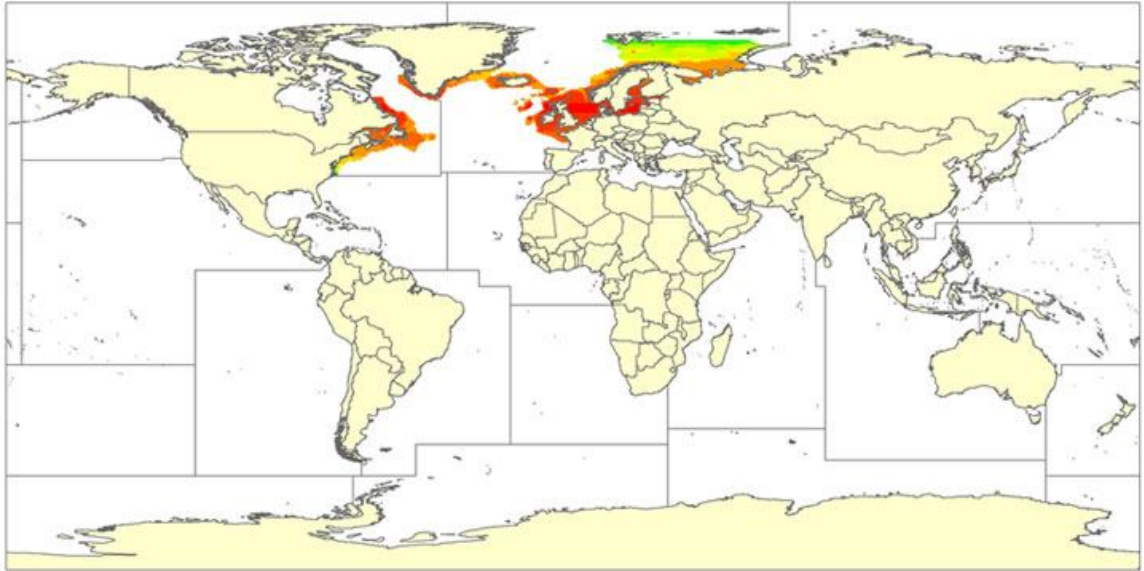


Figura 3.1: Zonas de cardumes de bacalhau [5]

O bacalhau consumido em Portugal, corresponde maioritariamente à espécie *Gadus Morhua*.

O bacalhau é um peixe osteíctio (dotado de esqueleto ósseo), tem o corpo comprimido lateralmente, com três barbatanas dorsais arredondadas e duas ventrais (figura 3.2). A barbatana caudal é ligeiramente côncava ou chanfrada. Habita a grandes profundidades (de 60 a 500 metros) e emerge à superfície de forma periódica [6].

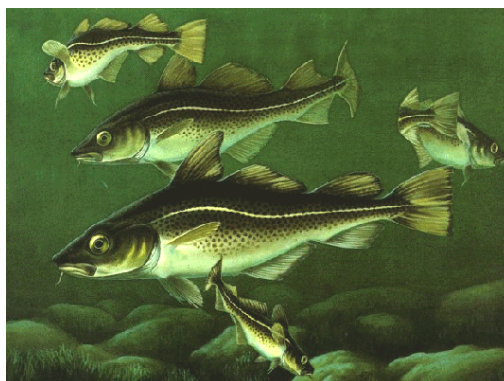


Figura 3.2: Peixe Gadus Morhua [7]



O bacalhau é um animal estenotermo (não suporta grandes variações de temperatura) habitando em águas com temperaturas entre 2° e 10°C. As alterações das condições ambientais (temperatura) podem provocar migrações podendo a espécie migrar em busca de outras águas que lhe sejam propícias, percorrendo 5 km por dia.

A fertilidade excepcional e o crescimento rápido são duas características que o distinguem das outras espécies de peixe. Desovam uma vez por ano – entre Janeiro e Abril - e cada fêmea, conforme o seu tamanho, chega a colocar cerca de 500 mil a 10 milhões de ovos de cada vez, embora poucos escapem aos ataques de aves e peixes (estima-se que 1% dos ovos sobrevivam) [6]. O desenvolvimento embrionário dura entre duas a quatro semanas, dependendo da temperatura da água. O bacalhau alcança 40cm de comprimento em dois anos; aos 10 anos já mede mais de 1 metro e pesa acima de 15 quilos; aos 20 anos, passam de 1,50m e dos 20 quilos. O bacalhau pode viver de 15 a 30 anos, chegando a medir dois metros e pesar até 50 quilos. Os exemplares comerciais do *Gadus Morhua* variam entre 1 e 13 quilos.

A Noruega é o principal produtor de bacalhau do mundo. O bacalhau da Noruega representa 50% do bacalhau à venda no mercado mundial. A textura, o sabor, o aroma prolongado, entre outras propriedades, fazem deste peixe um produto muito apreciado e utilizado na culinária de diversos países [6].

A carne do *Gadus Morhua* chega aos mercados consumidores em quatro condições: fresca (codfish), seca sem salga (stockfish), seca e salgada (bacalhau), salgada sem cura (verde) e defumada. O peixe fresco é distribuído para a Europa, primeiro para a Noruega, Dinamarca, Suécia e Holanda, países próximos das áreas de produção, e depois para os restantes países [6].

O mais nobre bacalhau produzido no arquipélago de Lofoten é o stockfish. É seco ao vento frio do Ártico durante três meses. Cortadas as cabeças e vísceras, os peixes são amarrados dois a dois pelo rabo e pendurados em estruturas de madeira. Chegam a perder até 77% do peso ao longo do período em que permanecem expostos ao vento. Por esse motivo, o seu preço é muito elevado. É consumido nos países europeus com grande poder de compra, sendo a Itália o maior importador e podendo o preço de um quilo de stockfish de primeira classe ultrapassar os 50 euros [6].

Mesmo depois de seco ao ar livre, o bacalhau não perde o teor de proteínas, pelo contrário, aumenta-o, uma vez que a água se evapora e a massa diminui. Assim, o peixe pode ser guardado até três anos sem que as qualidades nutricionais sejam alteradas.

O bacalhau fresco tem cerca de 80 a 83% de água. Seco tem cerca de 45% de teor em água, com um teor de sal até 20% [6].

Do bacalhau, como do porco, praticamente, tudo se aproveita. Por isso, na gíria, ele é conhecido como "porco-do-mar". Ele faz jus ao apelido: a carne é consumida fresca, seca com salga ou sem salga ou defumada. A língua e as ovas, também são consideradas iguarias; do fígado extrai-se um óleo, muito utilizado como fonte das vitaminas A e D e da bexiga produzem-se alguns tipos de cola [6].

A temporada de pesca coincide com a desova do bacalhau por isso, muitas fêmeas são capturadas antes de desovar. Nesse caso, separam-se e lavam-se as ovas em água doce sendo em seguida colocadas dentro de barricas de madeira (figura 3.3), intercaladas com uma salga composta de 70% de sal e 30% de açúcar, permanecendo em repouso durante um período de um a dois anos. Os países escandinavos consomem-nas cozidas, frequentemente como recheio em pratos à base de peixe. As ovas também são processadas na forma de caviar e exportadas para o Japão.



Figura 3.3: Ovas e seu processamento [6]

Apesar de possuir um valor inferior ao das ovas, o fígado de bacalhau tem mercado garantido para a produção do óleo de fígado de bacalhau, ao qual se atribui qualidades benéficas à saúde. Além do óleo, comercializa-se o fígado enlatado, conservado em azeite, e exportado para diversos países, principalmente os asiáticos [6].

3.1.2. Processamento do Bacalhau

O bacalhau passa por alguns processos até se apresentar no mercado (figura 3.4).

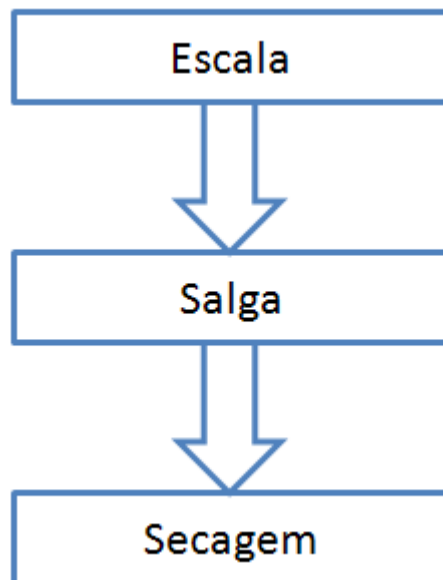


Figura 3.4: Fases do processo produtivo do bacalhau

O bacalhau é descarregado nas fábricas situadas nos cais dos portos. Segue-se a fase da escala, onde se procede à degola e limpeza das tripas. Já sem cabeça e vísceras, o peixe é lavado e processado numa máquina de escalar, que o espalma retirando dois terços da espinha central.

Após passar pela fase da escala (figura 3.5), o peixe é colocado, de forma sobreposta em tinas com sal a formar uma pilha homogénea [8].



Figura 3.5: Processo de escala [8]

A salga (figura 3.6) é um método de preservação e uma operação preliminar para o processo de secagem. Este processo dura aproximadamente um mês. A salga consiste no empilhamento do peixe com sal grosso dentro de grandes recipientes, onde ficam semi-submersos na água que o próprio peixe vai libertando, durante cinco a sete dias. De seguida os peixes são retirados dos tanques e escorridos. O bacalhau é posteriormente empilhado em paletes intercalado em camadas de sal grosso, onde repousam por mais 20 dias. O sal é trocado várias vezes conforme o tamanho e a espessura do peixe. O contacto com o sal garante uma cura óptima e uniforme, conferindo ao peixe o sabor e a textura tradicional do bacalhau [8].



Figura 3.6: Salga do bacalhau em fardos [8]

Para a obtenção de um peixe salgado de boa qualidade, convém aproveitar-se apenas peixes em condições sanitárias adequadas [9]. Isto é importante, pois se o bacalhau estiver em sal durante muito tempo, irá sofrer uma desidratação nas suas superfícies, sendo que algumas ficam “queimadas” devido ao longo período em contacto com o sal.

O índice de penetração do sal nos tecidos do peixe é inversamente proporcional ao conteúdo de gordura do músculo. Além de retardar o processo de salga, a gordura produz um sabor desagradável no peixe. O bacalhau salgado seco possui um teor de gordura de 25%. Quanto maior a espessura do músculo, mais demorado será o tempo de salga uma vez que, por maior que seja a velocidade de penetração do sal, maior é o percurso até ao centro do músculo.

No inverno, o processo de salga desenvolve-se com maior velocidade do que no verão, devido à elevada humidade relativa do meio ambiente, o que favorece a rápida penetração do sal no músculo do peixe [10].

3.1.3. Operações de Secagem do Bacalhau

Secagem natural ou artesanal

A secagem é uma prática antiga de conservação de alimentos. Com este processo pretende-se diminuir a massa de água de um produto, usando para isso a ajuda do calor e da circulação do ar.

A secagem dos alimentos é um método de redução do peso, do volume e da conservação do produto. A perda de água provocada pela salga e pela secagem nos alimentos, provoca uma inibição na actividade enzimática [11]. A inibição da actividade enzimática retarda por um longo período de tempo a deterioração dos alimentos, permitindo aos consumidores acesso a alimentos secos fora da época em que estes são produzidos ou capturados.

A secagem natural é um dos mais primitivos processos de preservação dos alimentos, tendo desde a antiguidade sido um dos recursos económicos mais importantes das populações, possibilitando as trocas comerciais, proporcionando o aumento da produção alimentar a partir de economias de escala e, obviamente para o caso do pescado, sustentando o desenvolvimento da pesca.



Figura 3.7: Secagem natural do bacalhau [12]

Os procedimentos são simples e rotineiros. A secagem natural pressupõe a exposição do peixe ao ar colocado sobre o solo pedregoso, sobre tabuleiros ou sobre estacaria feita de madeira (figura 3.7).

A secagem natural é contudo, um processo com enorme dependência das condições climáticas. Se o tempo estiver húmido ou chuvoso não ocorre evaporação, podendo



mesmo, no caso do pescado apanhar chuva, o efeito da salga ficar irremediavelmente perdido, pondo em causa o próprio produto. Por outro lado, se o tempo estiver muito quente, acima dos 26°/28°C, e conforme as condições de humidade e salinidade do bacalhau, podem ocorrer alterações na massa muscular e na pele – vulgarmente designadas por “melado” e, depois, por “queimado” – ficando o peixe praticamente sem condições de recuperação para o consumo.

Nos tempos com maior abundância de bacalhau as safras duravam cinco a seis meses e os navios chegavam aos portos com os porões muito cheios. Os bacalhaus eram então descarregados para as instalações de secagem, em terra.

A secagem natural era uma operação que requeria muita mão-de-obra, geralmente feminina. O bacalhau descarregado era lavado e escovado (caso não fosse necessária qualquer operação de ressalga), sendo depois disposto sobre as mesas e sujeito à incidência dos raios solares e do vento. As mesas são produto de uma geração mais recente, uma vez que, na origem, a mesma operação era realizada com o bacalhau espalhado sobre o solo, preferencialmente pedregoso e com leve inclinação. Actualmente conhecem-se casos em que nas diversas secas as “mesas” não são mais do que estendais de fio ou arame, de modo a facilitar o arejamento do peixe.

Porém, dadas as condições do nosso clima (e porque o bacalhau não deve estar sujeito a temperaturas superiores a 26/28°C), durante as estações mais quentes o peixe era espalhado pela madrugada, levantado pelas 9 ou 10 da manhã com a subida de temperatura, e voltava a ser espalhado com o arrefecimento do fim do dia.

Por vezes o peixe permanecia estendido durante a noite. Entre o levantar e o estender, o peixe era empilhado um sobre o outro, repetindo-se o procedimento tantas vezes quantas as necessárias para obter o grau de cura pretendido.

As tarefas de espalhar o peixe durante a manhã, levantá-lo, voltar a espalhar e deixá-lo até ao pôr-do-sol, conforme o clima, implicavam a disponibilidade de um número considerável de pessoas e de elevados gastos salariais [12].

A secagem natural é eficaz até à primavera pelas razões referidas anteriormente, e uma vez que nessa altura os raios solares não são muito intensos. Para uma secagem ao sol eficaz, são necessárias cerca de 10 a 15 semanas.

A secagem natural é económica no que se refere à instalação e ao tipo de energia utilizado. Os gastos iniciais mais elevados ocorrem na construção da estrutura de secagem

e na aquisição dos terrenos. É necessário fazer manutenção na estrutura, devido à degradação provocada pelas condições meteorológicas.

Este tipo de secagem apresenta contudo várias desvantagens: condições climáticas variáveis; necessidade de grandes áreas; necessidade de controlo de insectos e roedores; contaminação ambiental, elevados tempos de secagem e necessidade de muita mão-de-obra não especializada.

A secagem ao ar livre só é efectiva quando a humidade relativa é baixa, quando há calor e movimento do ar. O produto elaborado por este processo tem uma humidade média final da ordem de 50%, o que determina um tempo de conservação do bacalhau limitado [12].

Em 1923 foram citados alguns problemas decorrentes da secagem natural do bacalhau: um dos problemas apontados residia no facto de que o bacalhau seco apresentava um valor de humidade crítico para a conservação quando a temperatura ambiente era mais elevada. Ou seja, o bacalhau teria um tempo de conservação reduzido, tendo de ser comercializado rapidamente [12].

Secagem Artificial

De há muito tempo que se reconhece as vantagens da secagem artificial. A implementação da indústria da secagem artificial foi sintetizada por Duarte [12]. Em 1940, numa publicação do Grémio dos Armadores de Navios da Pesca do Bacalhau, defendia-se que deveria utilizar-se um novo processo de secagem, secagem artificial (tecnologia de ar forçado) [12].

Na secagem em estufas, a temperatura, a humidade e a velocidade do ar são controladas, diminuindo o tempo de secagem para cerca de 70-75h. Para as variáveis, velocidade e humidade relativa do ar, também chamadas de condições termodinâmicas de secagem, alguns autores [12] recomendam uma temperatura entre 17 e 20°C, humidade relativa entre 45 e 55% e velocidade do ar 1 a 3 m/s dentro da estufa.

As grandes vantagens da secagem artificial são: protecção do produto face a dejectos de aves, insectos, intempéries, poluição ambiente. Por outro lado é necessária

menos mão-de-obra. No entanto a principal vantagem é a redução do tempo de secagem do bacalhau.

A construção das estufas exige um elevado investimento inicial, quer para a construção quer para a aquisição das máquinas necessárias. Para controlar e fazer manutenção nas máquinas é necessária mão-de-obra especializada [13].

A figura 3.8 representa uma zona de uma indústria de secagem de bacalhau onde está situada a entrada de uma estufa.



Figura 3.8: Entrada de uma estufa de secagem de bacalhau [12]

A secagem artificial do pescado foi iniciada em 1940 pela Torry Research Station [10] (Inglaterra) que procedeu à utilização de equipamentos que possibilitavam o controlo das condições de secagem.

Portugal introduziu a tecnologia de ar forçado nas indústrias de secagem de bacalhau devido a motivos económicos. Os túneis de secagem foram instalados nas empresas Parceria Geral de Pescarias e na Sociedade de Pesca Luso-Brasileira. Os túneis eram utilizados quando o peixe se encontrava já próximo da cura final, a 7/8 da cura [12].

Em 1951 foram instalados na Empresa Comercial e Industrial de Pesca – Pescal, Lda, em Alcochete, os primeiros túneis de secagem nos moldes considerados de sistema convencional de secagem artificial. A empresa Lavadores, no Porto rapidamente se juntou a este tipo de tecnologia [12].

A passagem do sistema de secagem artificial para um sistema de secagem artificial foi demorada, visto que ainda não havia sido demonstrada a sua eficácia de modo a cativar todas as empresas de secagem de bacalhau. Nesta altura diziam que “o bacalhau seco artificialmente não é tão bom como o obtido com cura natural” [12]. A aquisição do novo sistema de secagem era muito dispendiosa e as empresas tinham receio de investir uma vez que não se sabia quanto tempo levariam a ter um retorno do investimento feito [12].

Em 1951 Ponti desenvolveu uma instalação de secagem com o objectivo de controlar a velocidade de secagem. A manufatura e montagem da instalação foram realizadas pela Metalúrgica Luso-Italiana, de Lisboa. Esta instalação possuía um sistema que permitia o aquecimento e o arrefecimento do ar no interior do túnel de secagem. A instalação possibilitava a condensação da água de modo a libertá-la para o exterior do túnel. Este sistema de controlo das condições de secagem permitia realizar a secagem durante o verão. O tempo de secagem do bacalhau diminuiu para cerca de 30/40 horas, dependendo da estrutura do bacalhau [12].

3.1.4. Indústria de processamento do Bacalhau

Em Portugal existem bastantes empresas de secagem de bacalhau que para além de se dedicarem à secagem do bacalhau também usam a refrigeração e congelação para a conservação de produtos alimentares. A indústria nacional de importação e transformação de bacalhau representada pela Associação dos Industriais de Bacalhau (AIB) é constituída por 42 unidades licenciadas, 81 por cento das quais na região centro do país, principalmente na Gafanha da Nazaré, em Ílhavo [14].

A indústria de importação e transformação de bacalhau processa anualmente cerca de 65 mil toneladas de bacalhau. O bacalhau importado corresponde a cerca de 75% do bacalhau consumido em Portugal. Os custos correspondentes ao processamento do bacalhau importado rondam os 500 milhões de euros [14].

A indústria de processamento do bacalhau é responsável por cerca de 1400 postos de trabalho directo e por cerca de três vezes mais de postos de trabalho indirectos [2].

Os problemas mais inerentes associados à secagem artificial do bacalhau são:

- a falta de sensores dentro das estufas de modo a saber quando o produto está seco e pronto a ser retirado das estufas;
- a não uniformidade das condições de secagem no interior por exemplo, a velocidade do ar entre os tabuleiros varia, o que faz com que a secagem não seja uniforme;
- a sazonalidade da ocupação das estufas, que são sobrecarregadas de bacalhau, por exemplo, no Natal;

- os custos energéticos. Para reduzir os gastos da energia, as estufas são desligadas em horários de tarifas mais elevadas (para que a água do interior do bacalhau saia para a superfície) [2].

3.1.5. Caracterização de uma Estufa

Tecnologia e Funcionamento de uma Estufa

A tecnologia de secagem artificial em uso para o bacalhau recorre a secadores do tipo batch dryers sendo a produção de frio assegurada por bombas de calor [15].

Os secadores são carregados com bacalhau empilhado em tabuleiros que permitem a passagem do ar de secagem entre camadas sucessivas. A velocidade do ar de secagem entre as camadas de bacalhau deve ser superior a 3 m/s. De forma a satisfazer as condições de velocidade do ar de secagem, são utilizados ventiladores axiais [15].

As bombas de calor utilizadas na secagem do bacalhau necessitam de um evaporador e de um condensador e operam geralmente com amoníaco como fluido refrigerante. O evaporador promove a remoção do calor do interior da estufa, enquanto o condensador aquece o ar no interior da estufa, de modo a se obter a temperatura desejada.

No exterior existem condensadores adicionais que dissipam o calor em excesso [15].

A figura 3.9 mostra o interior de uma estufa na zona de Aveiro. Na figura 3.10 está representado um esquema simples de uma estufa de secagem de bacalhau.

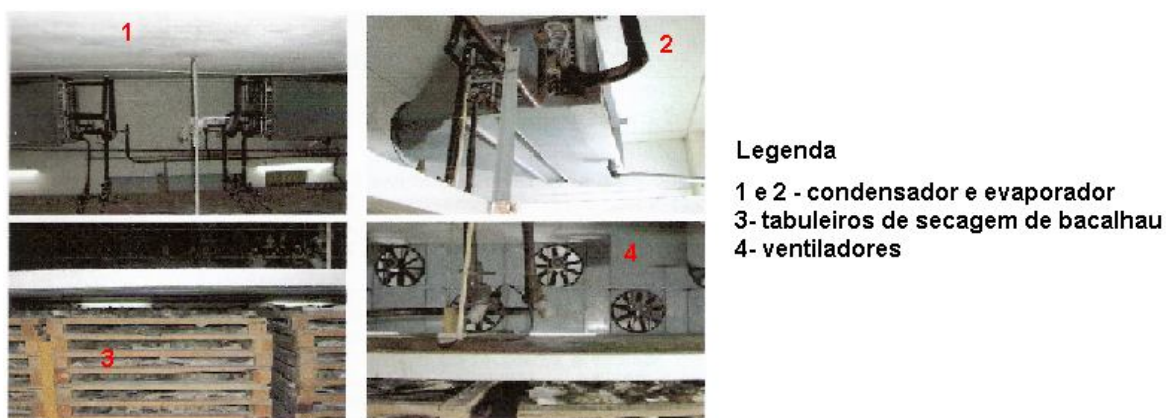


Figura 3.9: Visualização do interior de uma estufa [15]

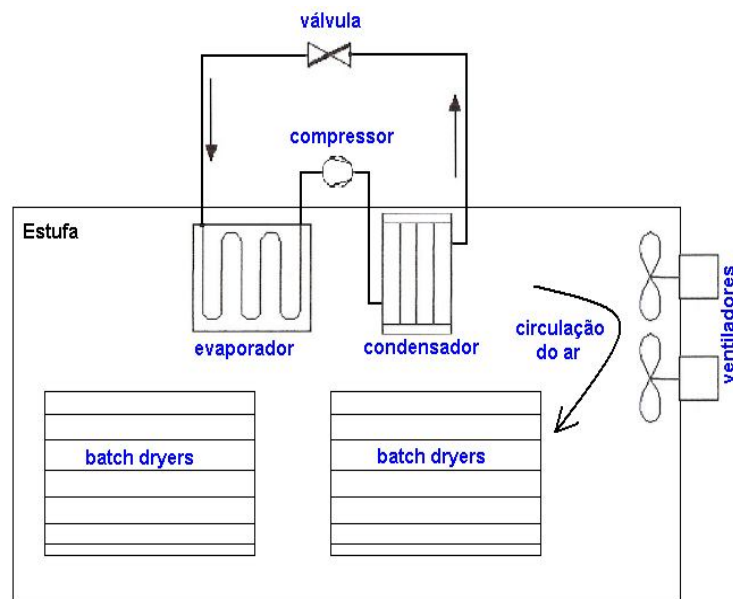


Figura 3.10: Esquema de uma estufa de secagem de bacalhau

3.1.6. Regras para o Comércio do Bacalhau

A nova lei de comercialização e armazenamento de bacalhau entrou em vigor a 29 de Abril de 2005 [16].

Até à entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 25/2005 de 28 de Janeiro, o bacalhau era classificado como: miúdo, corrente, crescido, graúdo e especial. A partir de 28 Janeiro 2005, estas designações continuaram a existir, mas apenas para o bacalhau salgado seco. De acordo com a legislação nacional em vigor [17], que estabelece as condições a que deve obedecer a comercialização do bacalhau e espécies afins salgados verdes, semi-secos ou secos, existem três espécies de bacalhau: Bacalhau ou Bacalhau do Atlântico (*Gadus Morhua*), Bacalhau do Pacífico (*Gadus Macrocephalus*) e o Bacalhau da Gronelândia (*Gadus Ogac*). A Abrótea (*Phycis blennoides*), o Alecrim (*Melanogrammus aeglefinus*), o Bacalhau do Ártico (*Eleginus Navaga*), o Bacalhau Polar (*Boreogadus saída*), o Escamudo (*Pollachius virens*), o Lingue (*Molva molva*), o Paloco (*Pollachius pollachius*), o Paloco do Pacífico (*Theragra chalcogramma*) e o Zarbo (*Brosme brosme*) são consideradas espécies afins [17].

No que diz respeito ao sal e à humidade, o bacalhau é classificado como “Verde” – bacalhau (ou espécie afim) com teor de sal de 16% ou superior e entre 51% a 58% de



humidade; “Semi-seco” – bacalhau (ou espécie afim) com teor de sal superior a 16% e entre 47% a 51% de humidade; “Salgado seco” – bacalhau (ou espécie afim) com teor de sal acima de 16% e humidade inferior ou igual a 47%; de “Cura amarela” – esta só se aplica ao bacalhau salgado seco que apresenta uma coloração amarelada característica e que apresente um teor de sal entre os 12% e os 16% e um teor de humidade igual ou inferior a 47% [16].

As espécies afins salgadas secas são classificadas de acordo com as seguintes referências: “Grande” – peixe de 1ª categoria com peso superior a 2 kg; “Médio” – peixe de primeira categoria com peso entre 1 kg e 2 kg; “Pequeno” – peixe de 1ª categoria com peso entre 0,5 kg e 1 kg, e ainda o “Sortido” – para os peixes de 1ª categoria com peso inferior a 0,5kg e para todos os peixes de 2ª categoria.

O bacalhau salgado seco de 2ª categoria é classificado em sortido, nas seguintes variações: Sortido superior a 3 kg; Sortido 2kg – 3kg; Sortido 1kg – 2kg; Sortido 0,5kg – 1 kg; Sortido inferior a 0,5kg [18].

3.2. Revisão Bibliográfica

Nesta secção é apresentada a pesquisa bibliográfica realizada e que serviu como apoio documental para a fundamentação do presente trabalho. Esta revisão permitirá ainda reforçar a importância da secagem na preservação do bacalhau.

Existe um número muito reduzido de artigos e trabalhos sobre secagem de bacalhau. Dos existentes, destacam-se os seguintes:

Andrés e al. [19] realizaram testes numa estufa controlando as condições internas (15 °C, 1.2 m/s e humidade relativa entre 50 e 65 %) de modo a determinarem a influência da salga na secagem do bacalhau. Os autores determinaram que a secagem é influenciada pela concentração de sal e pelo modo como é realizada a salga. Concluíram que a salga seca quando aplicada no bacalhau, desidrata mais o peixe do que quando se aplica a salga em salmoura. A desidratação provocada pela salga seca leva a uma diminuição do tempo de secagem uma vez que o teor de água removido pela salga seca é superior ao que se obtém com salmoura.

Carvalho [20] realizou testes sobre secagem de bacalhau, variando os parâmetros de secagem (velocidade e humidade do ar) para determinar a importância da velocidade de secagem e da humidade relativa na secagem do bacalhau. Ao usar valores da velocidade de

1.5 e 3 m/s e da humidade relativa de 60 e 70 %, concluiu que o aumento da humidade relativa provoca um aumento do tempo de secagem e o aumento da velocidade do ar diminui o tempo de secagem.

Existem estudos sobre a cinética de secagem de outro tipo de peixes que podem ter interesse para a secagem do bacalhau.

Prachayawarakorn e al. [21] conduziram estudos sobre a secagem de camarão salgado (cerca de 2-10% de sal) com velocidade de 1.6m/s, utilizando duas formas de secagem: secagem com vapor sobreaquecido (120-180 °C) e com ar quente (70-140 °C). Os autores concluíram que o produto seco com vapor sobreaquecido apresentava mais humidade no final da secagem, encolhia menos e apresentava cores ligeiramente mais intensas, comparando com a secagem com ar quente.

Djendoubia e al. [22] realizaram testes de secagem com sardinha salgada (10 % de sal), com temperaturas de 40,50,60,70 e 80 °C e humidades relativas de 14 % e 40 %, mantendo a velocidade do ar em 1.5 m/s. Os autores concluíram que a humidade final diminui com o aumento da temperatura; um aumento da temperatura provoca uma diminuição do tempo de secagem e o aumento da humidade relativa leva a um aumento do tempo de secagem.

Bellagha e al. [23] realizaram testes de secagem a 40 °C de temperatura, 1.5 m/s de velocidade do ar e humidade relativa de 13-17 %, com sardinha salgada de duas formas diferentes: salgada a seco e em salmoura (efectuada a 20 °C) de modo a verificar a influência da salga na secagem da sardinha. Os autores concluíram que para um mesmo período de salga a sardinha pós a secagem apresentava um teor de sal mais elevado quando lhe é aplicada a salga seca.

3.3. Cinética da Secagem do Bacalhau

Durante a secagem, é na superfície do material que ocorre a evaporação da água, a qual emerge do interior da amostra. Na figura 3.11 está representado um esquema da migração da água no bacalhau.

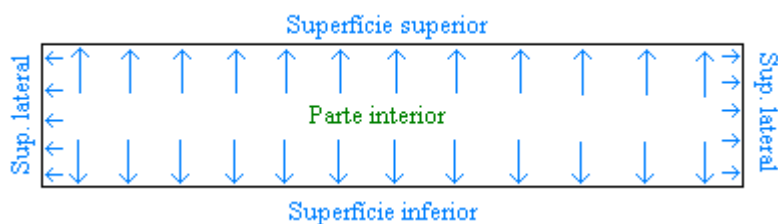


Figura 3.11: Esquema de migração da água do bacalhau para a superfície

A cinética de secagem não é generalizável para todos os materiais biológicos, pois estes possuem características e propriedades próprias que podem sofrer alterações durante a secagem. Por exemplo, a banana e a pêra têm constituições e formas diferentes, o que faz com que cada um tenha condições de optimização de secagem diferentes e consequentemente a secagem também é diferente.

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adoptado, determinam as diversas condições de secagem. A transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é um fenómeno comum a qualquer condição de secagem.

A cinética da secagem convectiva é geralmente caracterizada por três períodos distintos (figura 3.12).

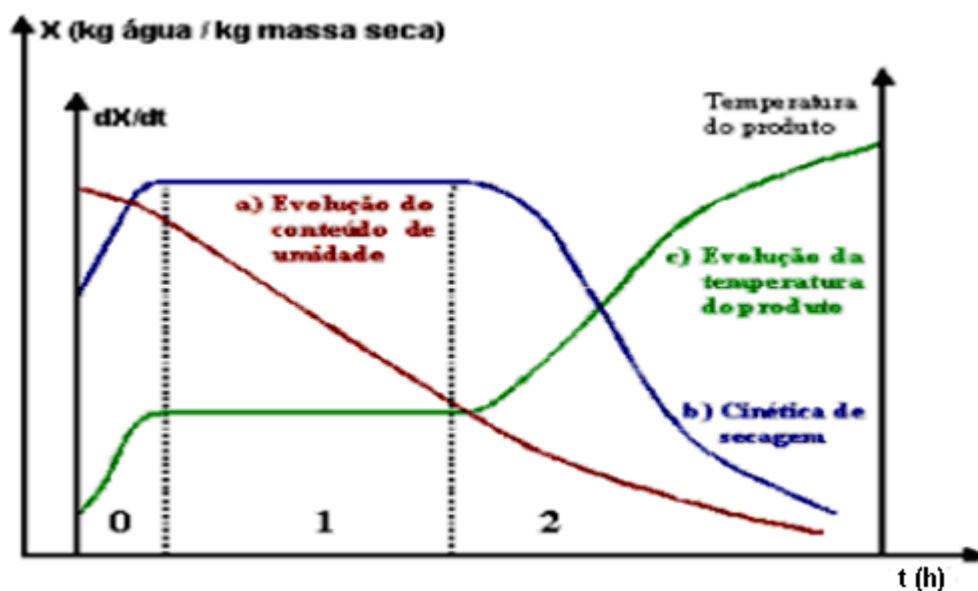


Figura 3.12: Curvas típicas da velocidade, humidade e temperatura no produto, durante a secagem

[20]

A curva (a) representa o teor de água do produto durante a secagem, ou seja, o conteúdo de humidade do produto (X), em função do tempo de secagem (t).

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (dX/dt) ao longo do tempo (t).

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem.

O período zero representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água.

O primeiro período caracteriza-se por uma taxa constante de secagem. A água evaporada é água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No segundo período, a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se a transferência de massa. O factor limitador nessa fase é a redução da migração de humidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de humidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo termina [20].

O conteúdo de humidade de uma substância exprime-se geralmente como percentagem de material seco (equação 1).

$$\text{Humidade de um material}_{base\ sec a} = \frac{m_{\acute{a}gua}}{m_{mat.\ sec o}} \times 100 \quad (\text{eq.1})$$

Expondo uma substância ao ar a uma dada temperatura e humidade, este poderá ganhar ou perder água até atingir o estado de equilíbrio. O teor de humidade de equilíbrio varia com o teor de humidade relativa e com a temperatura do ar.

A taxa de secagem é função da temperatura e da humidade relativa existentes, da velocidade com que o ar passa sobre a superfície da matéria-prima e da taxa de fornecimento de calor.

Na figura 3.13, pode observar-se um gráfico ilustrativo de um processo de secagem, onde se ilustra a variação de massa ao longo do tempo até se atingir o ponto de equilíbrio.

Este ponto é atingido quando a pressão parcial de vapor no produto é igual à do meio envolvente.

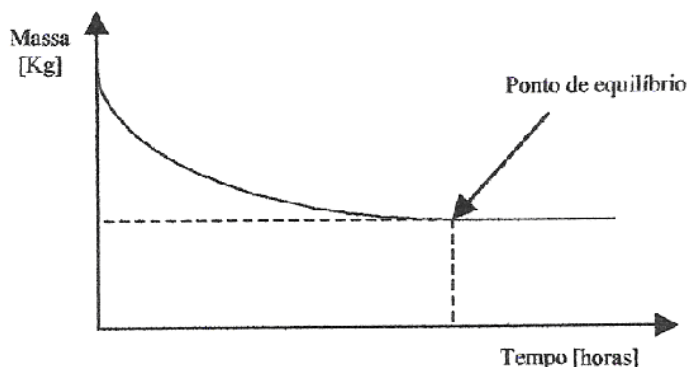


Figura3.13: Processo de secagem onde se atinge o ponto de equilíbrio

Para a compreensão da secagem do bacalhau e de modo a obter no final um produto com boa qualidade é necessário fazer um estudo das características que podem influenciar a secagem e a qualidade do produto final.

Denominamos taxa de secagem à quantidade de água removida por unidade de tempo, sendo esta quantidade expressa em g/h.

A operação de secagem consiste em dois fenómenos físicos: um deles é a evaporação da água a partir da superfície e o outro a migração da água do interior do produto até à superfície

Durante o período de velocidade constante, a superfície do pescado encontra-se húmida e a secagem depende apenas das condições do ar que circunda a matéria-prima, ou seja, da velocidade, da temperatura e da humidade relativa. O período de velocidade constante é geralmente muito curto, enquanto o da velocidade decrescente é bastante prolongado.

O conteúdo de humidade que divide as duas etapas denomina-se humidade crítica de secagem. No período de velocidade constante, verifica-se que o peixe seca gradativamente à medida que prossegue o processo de secagem e a humidade na superfície vai sendo removida, até que a superfície do pescado fique seca. A partir daí, a água a evaporar provém de zonas localizadas abaixo da superfície o que torna o processo de secagem mais lento. A partir deste ponto a velocidade de remoção da água é decrescente.

O período de velocidade decrescente ocorre até que se estabeleça o equilíbrio entre a pressão de vapor do material húmido e a pressão do vapor do ar circundante, que

depende principalmente do conteúdo de humidade do ar. A partir deste ponto é impossível a remoção adicional da água do pescado.

4. Metodologia Experimental

As experiências realizadas tiveram duas finalidades distintas. Nas experiências realizadas na câmara higrométrica procurou-se determinar a humidade de equilíbrio das amostras, de modo a verificar a influência da humidade relativa e da temperatura na humidade de equilíbrio.

Nas experiências realizadas na estação de secagem foram determinadas as curvas de secagem de modo a verificar qual a influência da humidade relativa e da velocidade de secagem nas curvas de secagem das amostras.

4.1. Selecção da matéria-prima

Foram utilizadas amostras disponibilizadas por uma empresa de secagem de bacalhau da zona de Aveiro de dois bacalhaus salgados verdes da espécie *Gadus Morhua*, as quais se mantiveram conservadas em sacos de plástico num frigorífico à temperatura de 5°C (figura 4.1) até à sua utilização.



Figura 4.1: Amostras de Bacalhau e corte das amostras

4.2. Equipamentos

4.2.1. Determinação das humidades inicial e final

Para a determinação das humidades inicial e final das amostras foi utilizada uma estufa (figura 4.2) da marca P Selecta. Esta estufa possibilita a obtenção de temperaturas até 250°C. As especificações técnicas da máquina encontram-se no anexo 1.



Figura 4.2: Estufa

4.2.2. Determinação das humidades de equilíbrio

A câmara higrométrica, marca TIRA clima e modelo TCC 4034, foi utilizada para a determinação da humidade de equilíbrio das amostras (figura 4.3). A câmara higrométrica existente no Departamento de Engenharia Mecânica tem um volume de 336 dm³, a temperatura no seu interior pode variar entre -40°C até 180°C e a humidade relativa tem uma variação de 10 a 98 %. A câmara higrométrica possui um painel de controlo onde são definidos os parâmetros para cada experiência. O ar circula no seu interior em regime turbulento [24].



Figura 4.3: Câmara Higrométrica TCC 4034 e respectivo painel de controlo

4.2.3. Determinação da massa das amostras

A massa das amostras foi obtida com recurso a uma balança digital da marca Every Berkel [25], modelo CC22 (figura 4.4). Esta balança pode ser ligada ao computador através de uma ligação RS232. A programação usada para a obtenção do valor da massa foi realizada no Matlab, através de uma mfile onde são definidos os valores de duração da experiência e do intervalo de registo do valor da massa. As especificações técnicas da máquina encontram-se no anexo 1.



Figura 4.4: Balança digital Avery Berkel

4.2.4. Determinação das curvas de secagem

Para a determinação das curvas de secagem foi utilizada uma estação de secagem A575 (figura 4.5), existente do Departamento de Engenharia Mecânica.



Figura 4.5: Estação de secagem A575

A estação de secagem é composta por vários elementos:

- Um ventilador centrífugo, com velocidade variável, actuado por um motor monofásico de 120W a 240V e a 50Hz, capaz de debitar um caudal máximo de $0.13\text{m}^3/\text{s}$ (figura 4.6). O ventilador é utilizado na movimentação do ar de secagem à velocidade programada;

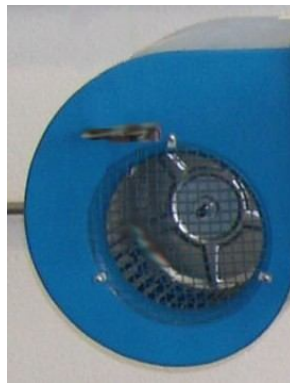


Figura 4.6: Ventilador de velocidade variável [26]

- Um injector de vapor (adicionável a partir de uma caldeira) para efeitos de humedificação (figura 4.7). A água da caldeira é aquecida à pressão atmosférica por três resistências, duas de 2kW e uma de 1kW. O reabastecimento da caldeira é feito com água da rede, comandada por um interruptor de nível ligado a uma válvula de solenoide;

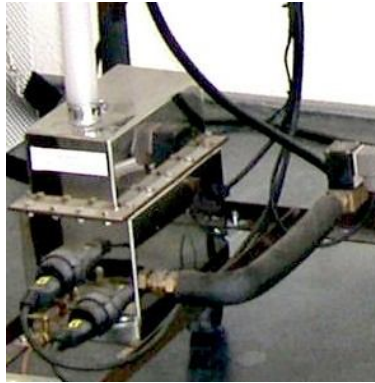


Figura 4.7: Caldeira [26]

- Um pré-aquecedor de ar para aquecimento do ar de secagem que é composto por duas resistências de 1kW cada, figura 4.8, localizadas logo após o ventilador;

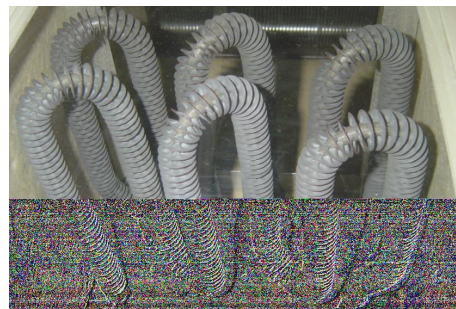


Figura 4.8: Resistências de 1kW [26]

- Um arrefecedor/desumidificador com tabuleiro para recolha de condensados composta por uma unidade de refrigeração com evaporador, condensador e compressor (figura 4.9), utilizando como fluido de refrigeração o R134a;



Figura 4.9: Compressor [26]

- Um re-aquecedor de ar composto por duas resistências de 0.5kW cada, figura 4.10, localizadas logo após o evaporador para aquecimento do ar de secagem;

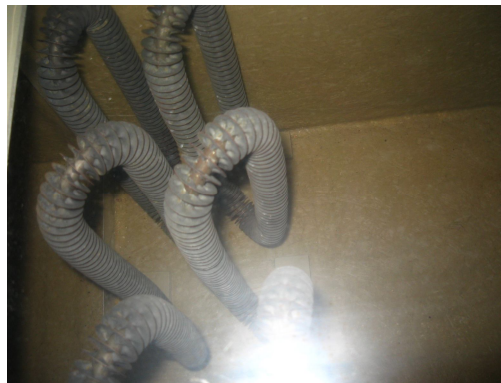


Figura 4.10: Resistências de 0.5kW

- Um painel de controlo, figura 4.11, com um interruptor para ligar/desligar a máquina (A), botoneira de selecção do modo manual/automático (B), oito interruptores para ligar ou desligar as resistências e unidade de refrigeração (C) e um transformador manual rotativo para variar a velocidade do motor do ventilador (D).

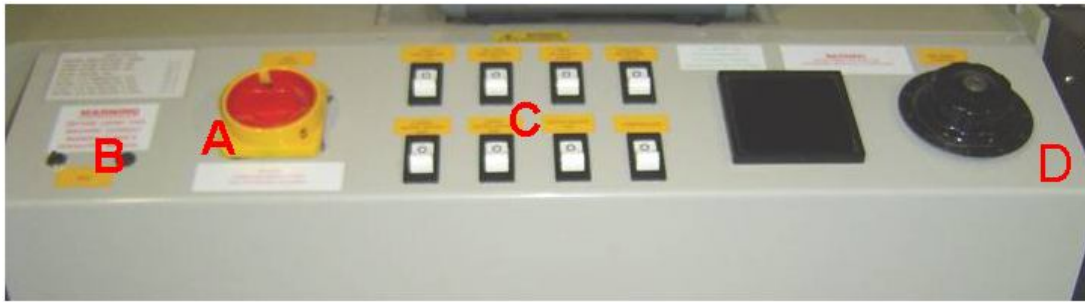


Figura 4.11: Painel de controlo dos diversos elementos da unidade A575 [26]

Controlo da instalação

Em função do sistema a controlar, o controlo em tempo real é estritamente necessário. O controlo é feito via Matlab através do módulo Real Time Windows Target com uma carta de aquisição de sinais.

A carta NI-PCI 6025E da National Instruments permite a aquisição dos sinais provenientes dos sensores da estação de secagem.

Duas portas I/O CB-50LP fazem o interface entre os sinais de leitura enviados pelos diversos sensores aplicados à estação de secagem e à placa de aquisição de dados.

O controlo da estação de secagem requer a aquisição dos sinais de temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do ar para que o programa de controlo faça o reajustamento dos parâmetros de secagem para os valores predefinidos na experiência.

Os sinais recebidos através da carta NI-PCI 6025E da National Instruments são gravados em pastas consoante o intervalo de gravação pretendido. No final de cada experiência procede-se à execução de uma mfile que transforma todos os dados recebidos numa único ficheiro com o nome Resultados. O programa tem uma função que permite visualizar graficamente a variação da humidade relativa do ar, da temperatura do ar e da velocidade do ar no decorrer da experiência.

Medição da humidade relativa e da temperatura

O Termo-higrómetro digital, figura 4.12, da marca Omega®, mede a temperatura e a humidade relativa do ar no interior da estação de secagem. A medição é feita numa zona próxima da amostra.



Figura 4.12: Termo-higrómetro digital

Medição da velocidade de secagem

Um micromanómetro da marca Feuners, modelo FC0510, figura 4.13, adquire um sinal analógico proporcional à velocidade. A velocidade é medida através de um tubo de Pitot por diferença entre a pressão dinâmica e a pressão estática. O sinal é linearizado pela função

$$\text{Velocidade} = 3.584 * \text{Sinal Micromanometro (eq.2)} [17]$$

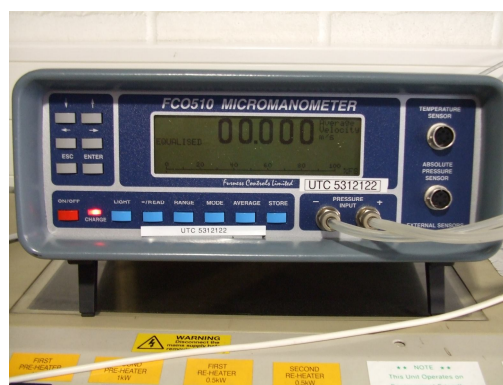


Figura 4.13: Micromanómetro

Medição da temperatura ambiente

Um termístor LM35, figura 4.14, é utilizado para a medição da temperatura. Este sensor gera um sinal analógico proporcional à temperatura (10 mV equivale a 1°C). O erro destes sensores é de cerca de ¼ de grau.

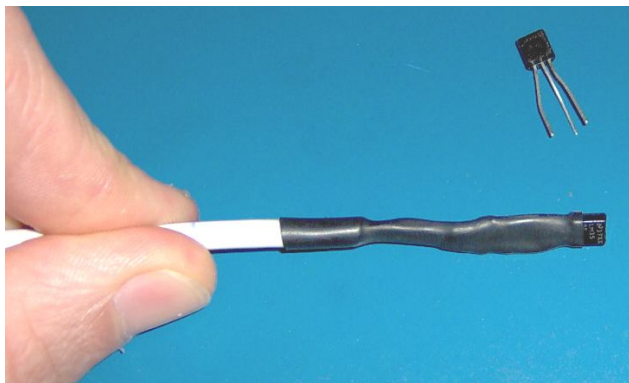


Figura 4.14: Sensor de temperatura LM35 [26]

Os componentes da máquina, nomeadamente resistências, ventilador e compressor, são comandados pelos sinais enviados pelo programa de controlo via carta de aquisição NI-PCI 6025E.

Todos os componentes ligados à placa CB-50LP geram impulsos eléctricos (0-10V) que são recebidos pela carta de aquisição. São estes impulsos que vão ligar ou desligar as resistências eléctricas. Isso é feito por intermédio de relés.

A velocidade do motor do ventilador é controlada através de um Variador ATV11 adequado ao controle de motores monofásicos.

O programa de controlo utilizado foi o módulo do Simulink® – Real-Time Windows Target do software Matlab®.

O programa de controlo permite programar vários estágios de secagem através de um modelo de input. Para cada estágio de secagem é definida a sua duração e o valor dos parâmetros de secagem (humidade relativa do ar, velocidade do ar, temperatura do ar).

Depois de colocados os dados no menu (figura 4.15), pode dar-se início à experiência.

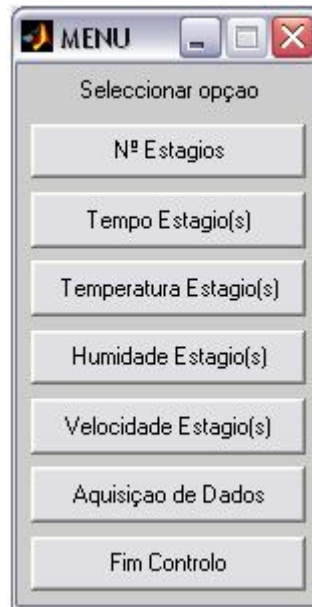


Figura 4.15: Menu de introdução de dados

4.3. Planificação das Experiências e da Análise dos Resultados

Dadas as limitações de temperatura associadas ao processo de secagem de bacalhau (20°C), optou-se apenas por controlar as variáveis velocidade do ar e humidade relativa mantendo-se a temperatura constante e igual a 20°C.

4.3.1. Método de Taguchi

Na planificação experimental e na análise dos resultados foi utilizado o método de Taguchi. O método Taguchi permite determinar a função perda do produto e otimiza-a empregando técnicas estatísticas. A análise conhecida permite identificar os parâmetros óptimos de projecto que minimizam ou mesmo eliminam as influências dos factores no desempenho do produto.

O Método de Taguchi, baseado em métodos factoriais e associado a análise de valor, permite estabelecer um número limitado de experiências a partir de um planeamento factorial completo.

O Desenho ou Planeamento de Experiências é uma técnica estatística que tem por objectivo melhorar a qualidade dos produtos e processos pois permite determinar quais os

factores que afectam determinadas características do produto e quais os níveis desses factores que optimizam a qualidade do produto e processamento do mesmo.

O Planeamento Factorial Completo estuda o efeito de todas as combinações possíveis, entre os níveis dos vários factores experimentados. À medida que o número de factores aumenta num planeamento factorial (L^n), sendo (L) o número de níveis por factor e (n) o número de factores, o número de experiências necessárias aumenta rapidamente.

As chamadas Matrizes Ortogonais (*Orthogonal Arrays*) definidas por Taguchi são utilizadas em projectos de engenharia que envolvem muitos factores onde é grande o número de possíveis combinações.

O objectivo para este trabalho é obter a informação relevante sobre o efeito dos factores com um número reduzido de experiências, devido à longa duração do tempo de execução das experiências.

Uma matriz ortogonal de Taguchi é constituída por várias combinações de níveis de factores, de modo que qualquer par de colunas cumpra as condições de ortogonalidade.

A notação usada é a seguinte: $L_a(b^c)$

Onde

- $a \rightarrow$ número de ensaios a realizar (ou combinações de níveis);
- $b \rightarrow$ número de níveis para cada factor;
- $c \rightarrow$ número de colunas (a atribuir a factores ou iterações).

As matrizes apresentadas na literatura [27] cobrem a maioria das experiências sendo utilizadas quando os factores controláveis apresentam os mesmos números de níveis (2,3 ou 4) e a interacção entre os factores seja desprezável. Quando tal não acontece há que utilizar as chamadas matrizes modificadas de modo a contemplar as particularidades próprias do problema em análise.

A matriz mais simples é a (L_4) para o estudo de três factores (A, B e C), com dois níveis cada (Tab.4.1).

Nº Experiências	Factores		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tabela 4.1: Matriz L_4 de Taguchi [28]

A matriz L_4 caracteriza as condições em que se deverão realizar as experiências, em que os factores a controlar são afectos às colunas da matriz e, para cada experiência, são indicados os níveis (1 e 2). No caso presente:

- A → humidade relativa;
- B → velocidade do ar
- C → interacção AxB.

Os valores da coluna C obtêm-se da relação dos níveis de A pelos níveis de B, de modo que $1 \times 1 = 1$, $1 \times 2 = 2$; $2 \times 1 = 1$; $2 \times 2 = 1$ [29].

4.3.2. Planificação Experimental

As etapas fundamentais na selecção e definição de um plano experimental são:

- 1) Selecção de factores e/ou interacções a estudar;
- 2) Selecção do número de níveis para os factores;
- 3) Selecção da matriz ortogonal de Taguchi adequada;
- 4) Atribuição de factores e/ou interacções às colunas da matriz ortogonal;
- 5) Execução dos ensaios/testes/experiências;
- 6) Análise dos dados;
- 7) Ensaio de confirmação.

O último ponto referente à planificação experimental não foi realizado devido ao tempo ser limitado e não dar para realizar novas experiências.

4.3.3. Planificação das experiências segundo o Método de Taguchi

Considerando uma experiência factorial total para os três factores a considerar e dois níveis para cada factor, temos o seguinte número de combinações,

$$2^2 = 4.$$

Ou seja, implicaria realizar quatro experiências.

A utilização de apenas dois níveis tem o inconveniente de apenas permitir estimar relações em linha recta, enquanto a utilização de três níveis permite a detecção da presença de curvatura. Foi escolhida a disposição ortogonal L_4 (2^2), com dois níveis, sendo que se espera no final uma relação linear entre cada um dos factores e o tempo de secagem.

Os factores escolhidos foram a velocidade do ar e a humidade relativa do ar com níveis representativos da realidade industrial.

4.4. Preparação das amostras para a determinação da humidade de equilíbrio

4.4.1. Preparação das amostras para a obtenção da humidade de equilíbrio

Na preparação das amostras foi seguido o seguinte procedimento:

- foi retirada a espinha principal e cortadas quatro postas do bacalhau como a observada na figura 4.16, para as primeiras três experiências;



Figura 4.16: Amostra para secagem

- foram cortadas amostras em forma de cubos e foi desfiado bacalhau de modo a obter amostras aproximadamente em forma de esferas (figura 4.17), a partir da quarta experiência;



Figura 4.17: Amostras com formato de um cubo e de uma esfera

De modo a verificar a influência da pele na determinação da humidade de equilíbrio, foi preparada uma esfera que foi envolvida com pele do bacalhau. Procedeu-se ao corte de um cubo, contendo pele em ambos os lados de modo a determinar as humidades de equilíbrio.

As esferas e os cubos tinham aproximadamente 25 mm de diâmetro, 30 mm de aresta e 25 mm de espessura. As restantes amostras tinham aproximadamente 110x30 mm.

Para o cálculo da humidade inicial das amostras foram cortadas amostras com dimensões 110 x 10 mm (figura 4.18).

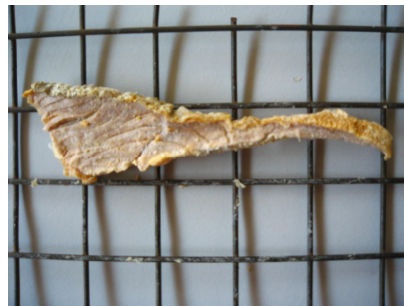


Figura 4.18: Amostra para determinação da humidade inicial

No caso das formas geométricas, o tamanho das amostras era idêntico ao das amostras que eram colocadas na câmara higrométrica.

4.4.2. Execução das experiências

A câmara higrométrica foi programada definindo as condições de temperatura e humidade relativa desejadas e colocando as amostras no seu interior. O registo do valor da massa das amostras foi feito duas vezes ao dia (de manhã e ao fim da tarde), de forma a verificar se havia ou não variação da massa das amostras. Quando a variação era insignificante, as amostras foram retiradas e colocadas na estufa a aproximadamente 100 °C, durante aproximadamente dois dias.

Foram colocadas duas amostras (sem forma definida) sujeitas às mesmas condições de secagem, sendo que uma estava numa superfície sólida e outra estava suspensa por uma rede de modo a verificar a influência na humidade de equilíbrio da exposição da amostra ao ar.

Foi realizada uma experiência com 40°C de temperatura e com humidade relativa de 23, 18 e 14,5 % de modo a verificar a influência da temperatura na obtenção da humidade de equilíbrio.

Foram repetidas as experiências na câmara higrométrica com os seguintes parâmetros de secagem: (20°C,40%) para ambas as amostras e (20°C,60%) para as amostras em forma de cubos de modo a fazer uma confirmação dos valores das humidades de equilíbrio.

4.5. Preparação das amostras para a determinação da cinética de secagem

4.5.1. Preparação das amostras para a obtenção da humidade inicial e final

As amostras foram obtidas de forma semelhante às utilizadas na determinação das humidades de equilíbrio.

4.5.2. Execução das experiências

Na estação de secagem, o programa de controlo foi executado de modo a que sejam obtidas as condições pretendidas. A humidade absoluta foi obtida através da humidade relativa do ar, pretendida de acordo com:

$$HA = 0,622 / ((P_{atm} / ((HR / 100) \times P_{sat @ 20^{\circ}C})) - 1) \times 1000 \text{ (eq.3) [19]}$$

Onde

- $HA \rightarrow$ humidade absoluta [g vapor/kg ar seco];
- $P_{atm} \rightarrow$ pressão atmosférica = 101325 Pa ;
- $HR \rightarrow$ humidade relativa pretendida [%];
- $P_{sat @ 20^{\circ}C} \rightarrow$ pressão de saturação à temperatura de $20^{\circ}C = 2339\text{Pa}$ [19].

As primeiras quatro experiências tiveram duração de 75h, uma vez que se considerou que o tempo de secagem do bacalhau seria aproximadamente esse. As restantes tiveram uma duração de 100h, uma vez que se constatou que a taxa de secagem era ainda significativa após 75h de secagem. Depois de terminada a secagem, as amostras foram colocadas na estufa para determinar a humidade final.

Foram repetidas as experiências na estação de secagem com os seguintes parâmetros: ($20^{\circ}C, 40\%, 3\text{m/s}$), ($20^{\circ}C, 50\%, 3\text{m/s}$) e ($20^{\circ}C, 60\%, 3\text{m/s}$) devido à existência de água acumulada na zona de condensação, por causa de um problema existente na tubagem de eliminação dos condensados.

4.6. Cálculo do teor de água inicial e final das amostras

Para determinar o teor inicial de água foram colocadas directamente na estufa pequenas amostras extraídas das amostras originais.

O teor de água final foi calculado através das amostras provenientes da câmara higrométrica e da estação de secagem que posteriormente foram colocadas na estufa.



No final de cada experiência, foi calculado o teor de água inicial e final, usando as massas antes e após secagem na estufa. O teor de água inicial e final foi calculado através das seguintes equações:

$$X_1 [\%base_{seca}] = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \text{ (eq.4)}$$

$$X_2 [\%base_{humid}] = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \text{ (eq.5)}$$

Onde,

- $X_1 \rightarrow$ teor de água em base seca;
- $X_2 \rightarrow$ teor de água em base húmida;
- $m_i \rightarrow$ massa da amostra antes da secagem em estufa;
- $m_f \rightarrow$ massa da amostra após secagem em estufa.

4.7. Parâmetros Experimentais

4.7.1. Na Câmara Higrométrica

A tabela 4.2 representa as condições de operação da câmara higrométrica para todas as experiências realizadas.

Experiências	Condições de secagem na Câmara Higrométrica	
	Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]
I	20	40
II	20	50
III	20	60
IV	20	60
V	20	40
VI	20	50
VII	20	40
VIII	20	60
IX	40	23
	40	18
	40	14,5

Tabela 4.2: Condições de secagem na câmara higrométrica

As condições de secagem consideradas na experiência IX foram retiradas de uma experiência realizada com sardinha [30] de modo a verificar a influência da temperatura na obtenção da humidade de equilíbrio.

4.7.2. Na Estação de Secagem

Na tabela 4.3 foram representadas as condições de secagem para todas as experiências realizadas na estação de secagem.

Experiências	Condições de secagem na Estação de Secagem (A575)		
	Temperatura [°C]	Humidade Relativa[%]	velocidade [m/s]
I	20	40	3
II	20	50	3
III	20	60	3
IV	20	40	3
V	20	50	1.5
VI	20	60	1.5
VII	20	50	3
VIII	20	60	3

Tabela 4.3: Condições experimentais de secagem na estação de secagem A575

A temperatura ambiente era aproximadamente 28.5°C para todas as amostras.

5. Resultados

5.1. Humidades de Equilíbrio

Na tabela 5.1 foram representadas os valores das humidades de equilíbrio das experiências I, II e III realizadas na câmara higrométrica. Verifica-se que a humidade de equilíbrio aumenta com o aumento da humidade relativa excepto na amostra exposta a 60% de humidade relativa, devido às características físicas da amostra terem sido alteradas pelo longo período de contacto com o sal na superfície da amostra.

A exposição de toda a superfície da amostra ao ar de secagem, tem influência na determinação da humidade de equilíbrio, como se verifica na experiência II da tabela 5.1.

Experiências	Base Húmida
I (20°C,40%)	12,4
II [Amostra sobre a rede(20°C,50%)]	22,6
II [Amostra sobre uma sup.sólida(20°C,50%)]	27,2
III (20°C,60%)	14,6

Tabela 5.1: Humidades de Equilíbrio na câmara higrométrica das exp. I-III

Na tabela 5.2 foram representadas os valores das humidades de equilíbrio das experiências realizadas na câmara higrométrica, com amostras de geometrias definidas (cubos e esferas).

Experiências	Geometrias	Média (bh)
Exp.5 (20°C,40%)	cubos	17,9
	esferas	9,3
	esfera (revest.pele)	24,8
Exp.7-Rep.(20°C,40%)	cubos	19,1
	esferas	6
Exp.6 (20°C,50%)	cubos	14,2
	cubo (pele enc.embaix.)	17,2
	esferas	9,6
Exp.4 (20°C,60%)	cubos	24,5
	esferas	15,2
Exp.8-Rep. (20°C,60%)	cubos	26,4
(40°C,23%)	cubos	4,2
(40°C,18%)	cubos	3,6
(40°C;14,5)	cubos	3

Tabela 5.2: Humidades de Equilíbrio na câmara higrométrica entre geometrias



As amostras esféricas revelaram teores de humidades de equilíbrio inferiores aos encontrados nos cubos. As esferas não ficavam tão compactas como os cubos o que condicionou o valor da humidade de equilíbrio.

A humidade de equilíbrio nas esferas aumenta com a subida do valor da humidade relativa.

Nos cubos a humidade de equilíbrio não tem um aumento progressivo com a subida da humidade relativa. No cubo exposto a 50% de humidade relativa obteve-se um valor de humidade de equilíbrio inferior ao do cubo exposto a 60% de humidade relativa, devido às condições físicas apresentadas pela amostra.

Na experiência realizada a 40°C, verificou-se que a temperatura tem influência na determinação da humidade de equilíbrio, uma vez que os resultados para a humidade de equilíbrio são muito menores que para as amostras expostas a 20°C (figura 5.2).

A humidade de equilíbrio da esfera revestida com pele é muito mais elevada (24,6) comparada com a humidade de equilíbrio das outras esferas, colocadas nas mesmas condições de secagem. Para um mesmo período de tempo na câmara higrométrica, verificou-se que a pele do bacalhau influencia a determinação da humidade de equilíbrio, como se observa na tabela 5.2.

O cubo com pele na face superior e inferior tem uma humidade de equilíbrio superior ao cubo que só tinha pele na face inferior, como se observa na tabela 5.2.

As humidades de equilíbrio das amostras da câmara higrométrica estão representadas na figura 5.1 e 5.2.

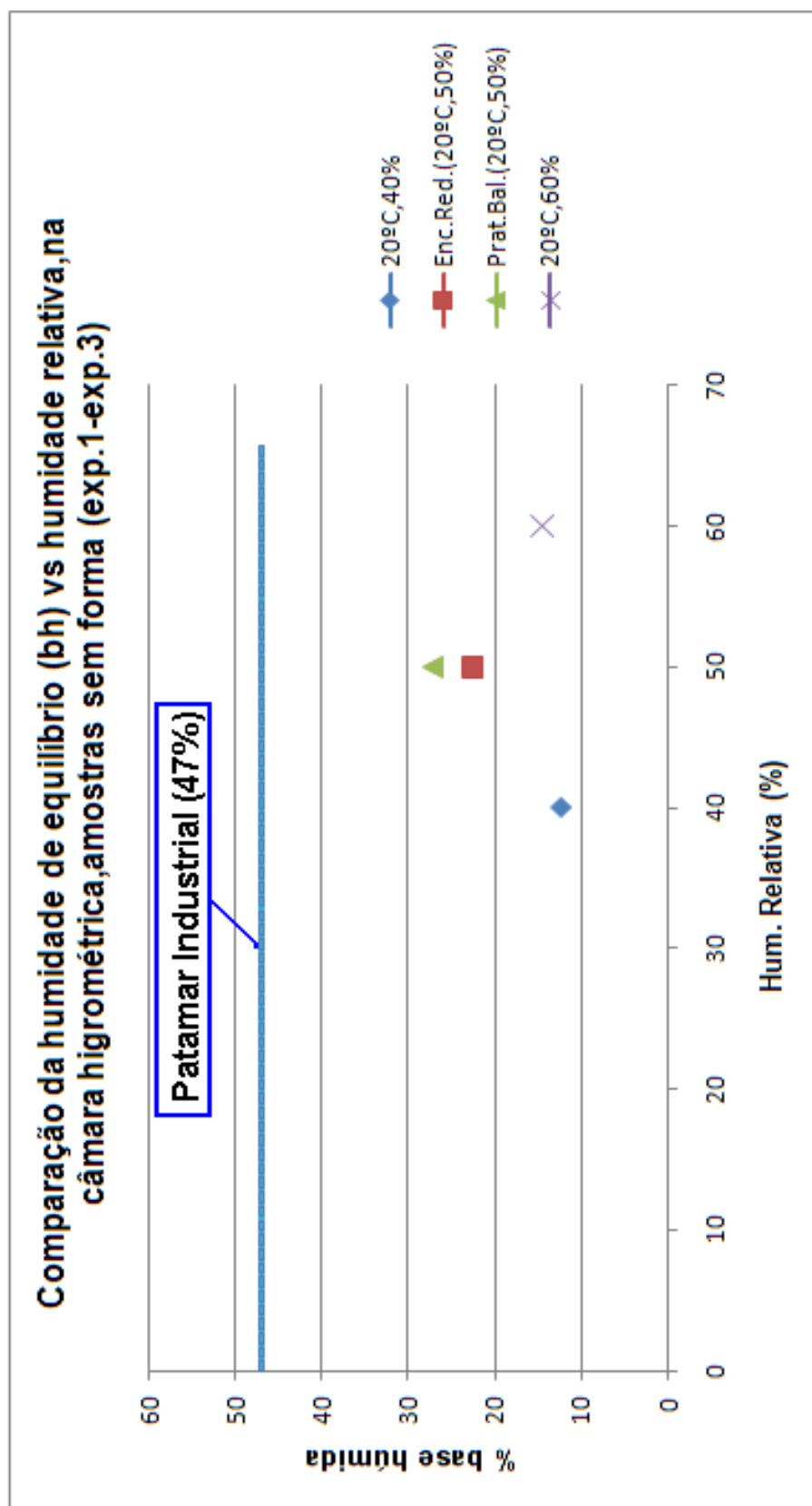


Figura 5.1: Comparação da humidade de equilíbrio das experiências I-III



Figura 5.2: Comparação da humidade de equilíbrio entre formas geométricas



5.2. Cinética da secagem

5.2.1. Curvas de Secagem

Na representação da variação da massa da amostra em função do tempo (**figura 5.3**) foi utilizada média móvel (intervalo de 5 dados, excepto nos últimos 5 valores em que foi calculada usando um intervalo de 4, 3, 2 e 1 de modo a obter valores mais próximos dos registados).

As variações das condições experimentais ao longo do tempo são apresentadas no anexo 2. Os gráficos apresentados são os correspondentes às experiências em que as condições experimentais se aproximaram das condições pretendidas.

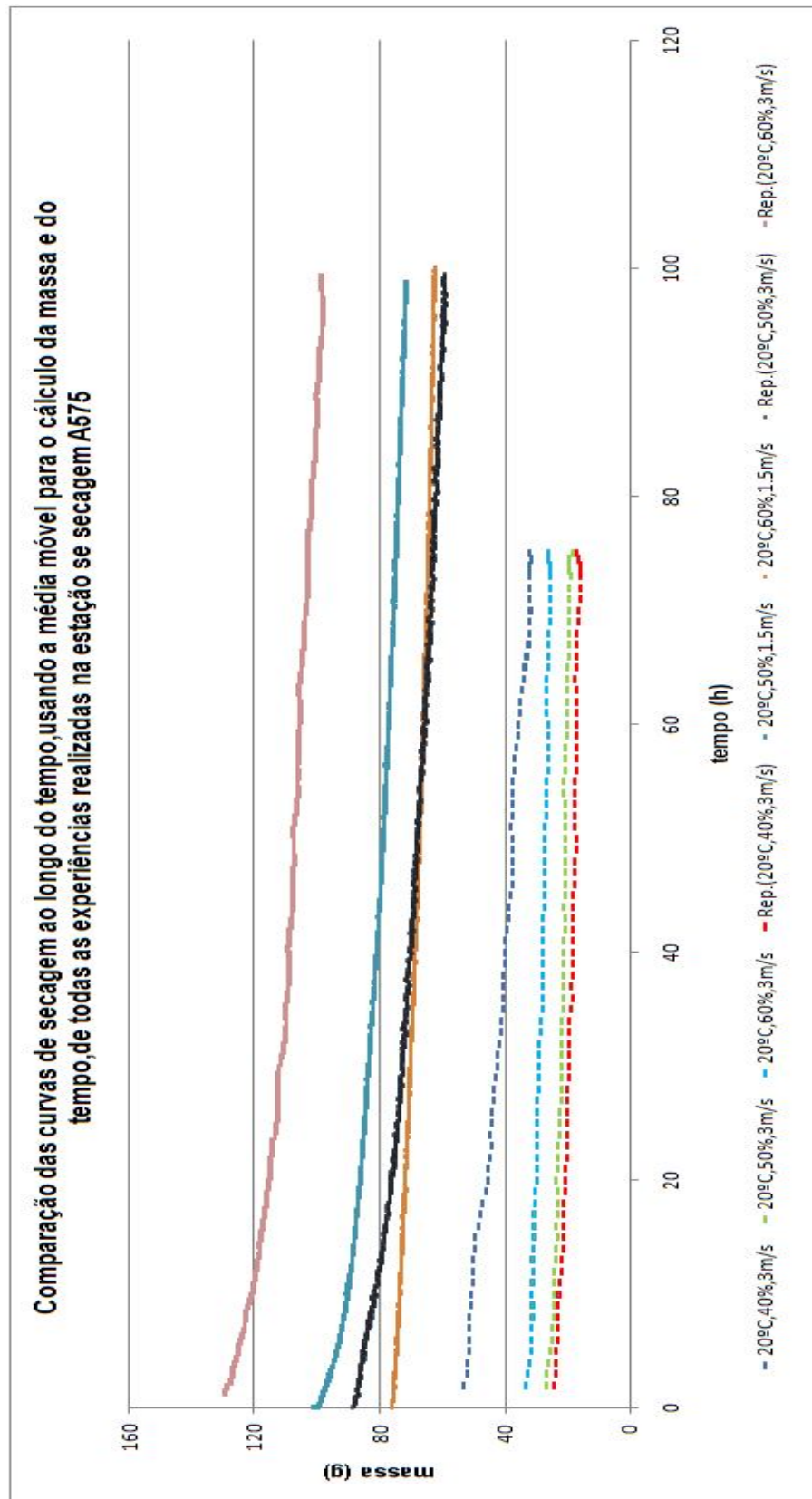


Figura 5.3: Curvas de secagem de todas as experiências

5.2.2. Gráfico Adimensional

Para possibilitar uma comparação entre todas as amostras, foram obtidos gráficos adimensionais (figura 5.4), que correspondem a:

$$\frac{m - m_f}{m_i - m_f} = f(t) \text{ (eq.6)}$$

Onde,

- m_i → massa inicial da amostra;
- m_f → massa final da amostra;
- m → massa em cada instante;
- t → tempo.

Foi utilizada a média móvel para o cálculo da massa e do tempo.

Na figura 5.4 observa-se que nas experiências V, VI, VII e VIII, as curvas não apresentam grandes oscilações ao longo do tempo. Nas quatro primeiras experiências as curvas apresentam oscilações devido à água acumulada na zona de condensação da estação de secagem.

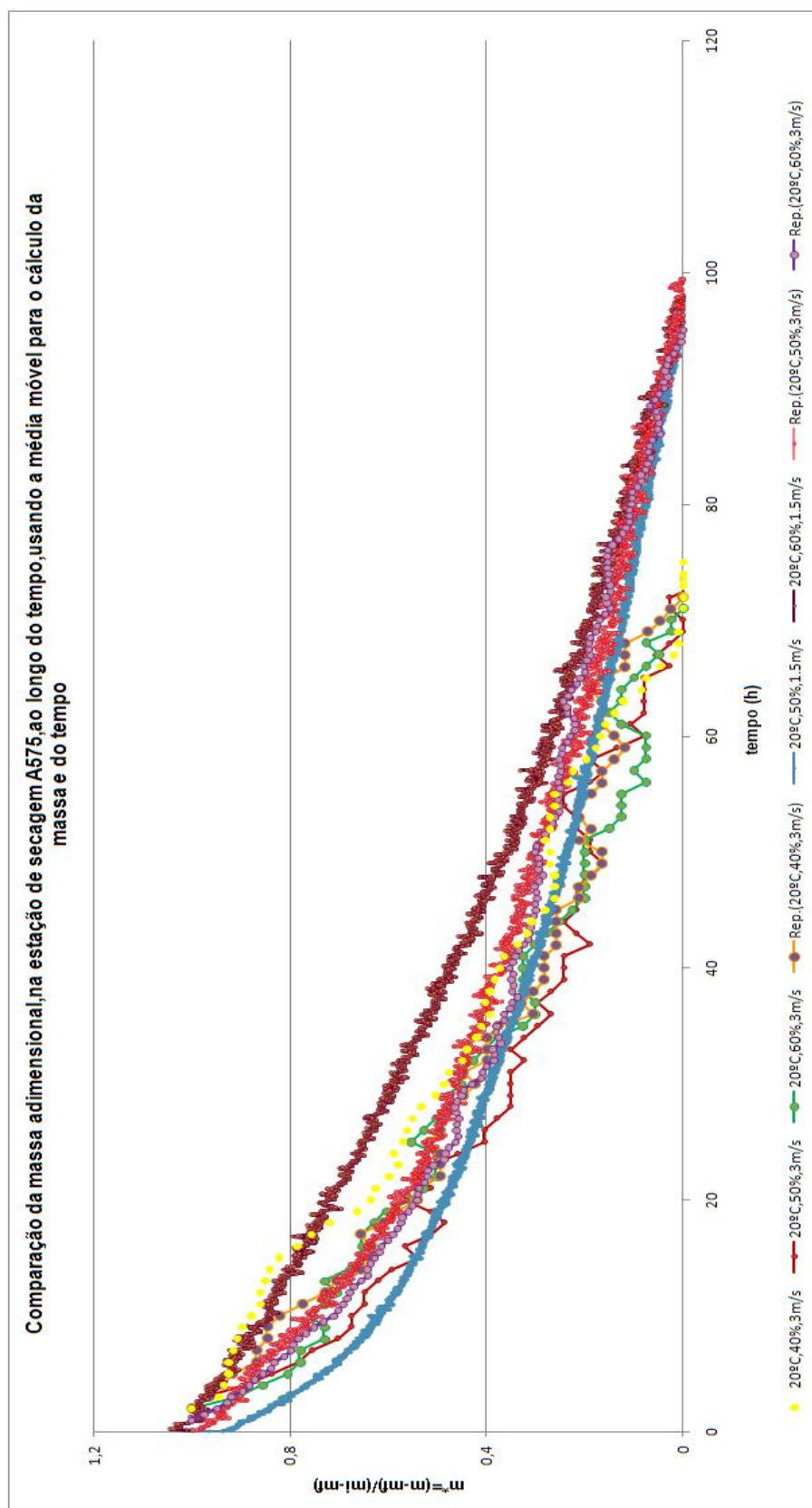


Figura 5.4: Massa adimensional de todas as experiências

5.2.3. Taxa de secagem

A taxa de secagem (g/h) foi obtida usando a seguinte equação:

$$Taxa_{secagem} = \frac{m_{i+1} - m_i}{t_{i+1} - t_i} \times 100 \text{ (eq.7)}$$

Onde,

- $m_i \rightarrow$ massa no instante t [g];
- $m_{i+1} \rightarrow$ massa no instante $t + \Delta t$ [g].

O gráfico da taxa de secagem não tem leitura devido à variação da massa das amostras provocada por oscilações do prato da balança causadas pela incidência aerodinâmica do escoamento, pelo que se prescindiu da sua apresentação.

Em alternativa foi representado na tabela 5.3 o tempo de secagem para perdas de 5, 10, 15, 20 e 25 % da massa inicial da mostra.

Nas experiências realizadas a 1.5m/s, observa-se que o tempo de secagem para a perda de 5% da massa inicial, sofre um aumento de mais de cinco vezes com a passagem da humidade relativa de 50 para 60%. Para a perda de 10% da massa inicial sofre um aumento no tempo de secagem de cerca de nove vezes e para a perda de 15% de massa inicial sofre um aumento no tempo de secagem de cerca de seis vezes.

As experiências realizadas antes da resolução do problema existente na zona de condensação da estação de secagem (I a IV), para as mesmas perdas de massa inicial não apresentam uma subida generalizada do tempo de secagem com o aumento da humidade relativa. A partir da perda de 15% de massa inicial, verifica-se que o aumento da humidade relativa leva ao aumento do tempo de secagem.

Comparando a experiência VI (20°C,60%,1.5m/s) e a experiência VIII (20°C,60%,3m/s), verifica-se que um aumento na velocidade de secagem leva a que o tempo de secagem diminua, como se verifica na tabela 5.3. Para a perda de 5, 10 e 15% da

massa inicial, verifica-se uma diminuição de cerca de quatro vezes, de três vezes e de duas vezes, respectivamente.

A experiência VI teve uma perda de cerca de 15% da sua massa inicial devido à velocidade ser baixa (1.5m/s) e ter 60% de humidade relativa

Perda de massa	Tempo [h:min]				
	5%	10%	15%	20%	25%
Exp.I (20°C,40%,3m/s)	0:40	2:50	16:10	19:55	28:37
Exp.IV (20°C,40%,3m/s)	1:22	7:45	13:17	20:57	33:28
Exp.II (20°C,50%,3m/s)	5:15	10:22	16:57	29:17	57:35
Exp.VII (20°C,50%,3m/s)	4:10	10:51	18:59	31:23	47:30
Exp.III (20°C,60%,3m/s)	1:57	8:54	20:23	42:08	53:43
Exp.VIII (20°C,60%,3m/s)	5:07	13:45	30:27	61:00	93:39
Exp.V (20°C,50%,1.5m/s)	0:25	4:59	13:28	29:32	52:56
Exp.VI (20°C,60%,1.5m/s)	21:43	44:18	74:06		

Tabela 5.3: Tempos relativos à perda de massa inicial de 5%,10%,15%,20% e 25% para cada amostra

5.2.4. Teor de humidade

Do ponto de vista industrial, o teor de humidade do bacalhau salgado seco tem de ser menor ou igual a 47%. Deste modo o gráfico do teor de humidade é muito importante, de modo a poder verificar qual o tempo de secagem para as diversas condições de secagem.

O teor de humidade foi obtido usando a seguinte equação:

$$Teor_{humidade} = \frac{(h_f - h_i) \times (m - m_i)}{m_f - m_i} + h_i \text{ (eq.8) [19]}$$

Onde,

- $m_i \rightarrow$ massa inicial da amostra (g);
- $m_f \rightarrow$ massa final da amostra (g);
- $m \rightarrow$ massa em cada instante (g);



- $h_i \rightarrow$ teor de humidade inicial (% base húmida);
- $h_f \rightarrow$ teor de humidade final (% base húmida).

Na figura 5.5 visualiza-se o teor de humidade ao longo do tempo de secagem das amostras.

Na indústria de secagem do bacalhau pretende-se atingir um valor de humidade igual ou menor que 47%, no caso do bacalhau salgado seco. Na figura 5.5 verifica-se que, o limite de 47% de humidade foi alcançado antes do fim de cada experiência. Para a experiência I o patamar de humidade foi alcançado no fim de 17h. Para as restantes experiências os tempos de secagem para atingir o patamar da humidade foram: 30h para a experiência II; 28h para a experiência III; 13h para a experiência IV; 23h e 10min para a experiência V; 55h e 25min para a experiência VI; 27h e 39min para a experiência VII e 41h e 50min para a experiência VIII. Os tempos referenciados foram uma aproximação para os valores de humidade menores ou iguais a 47%.

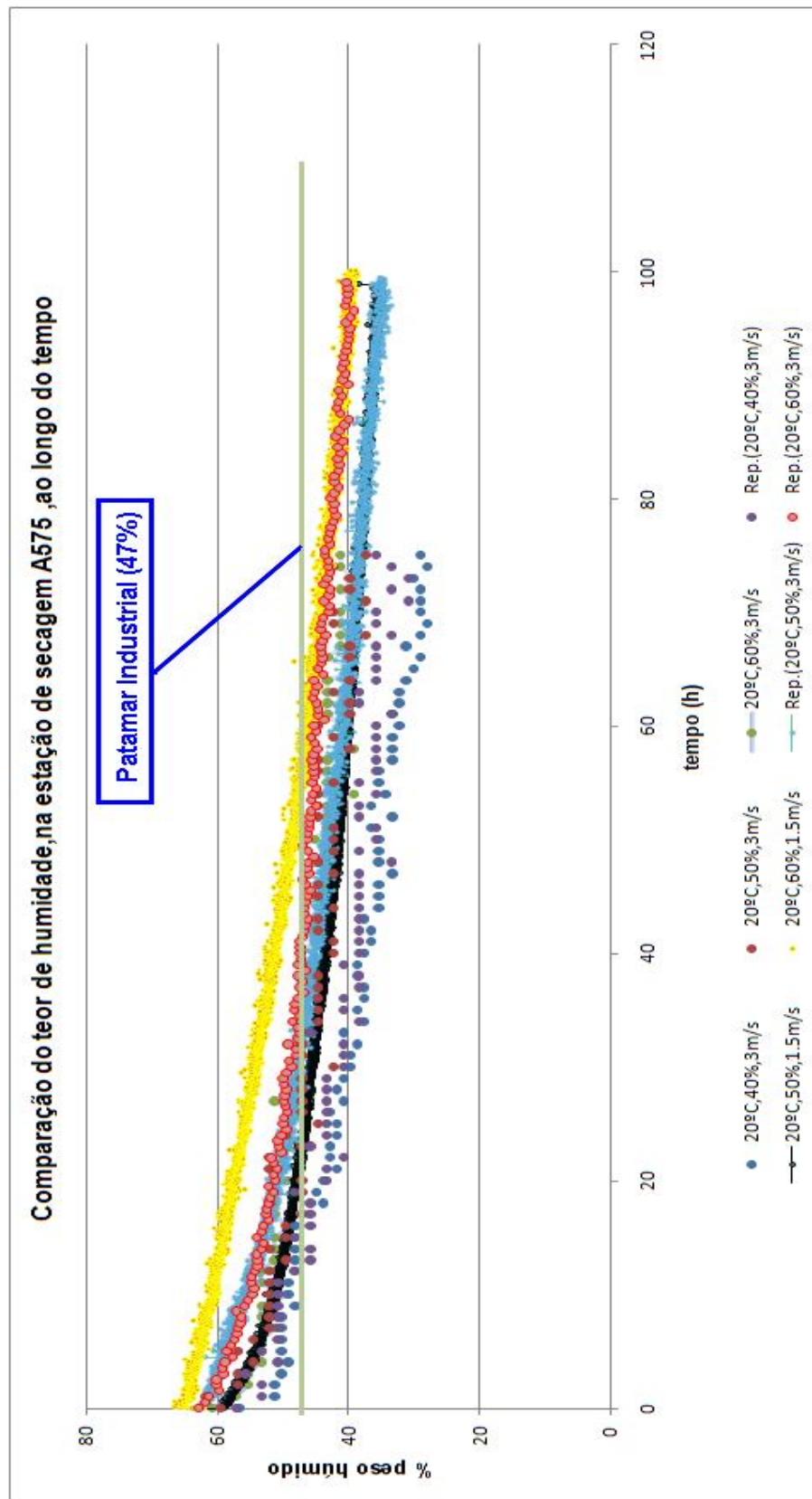


Figura 5.5: Teor de humidade de todas as experiências



Na figura 5.5 está representado o limite máximo de teor de água definido no decreto de lei Decreto-Lei nº 25/2005 de 28 de Janeiro, para o bacalhau salgado seco. A partir desse limite não é necessário prolongar a seca do bacalhau pois a 47% já se encontra dentro do critério definido pelo decreto de lei n.º 25/2005 de 28 de Janeiro.

6. Discussão e Conclusões

6.1. Análise da cinética da secagem

Através do método de Taguchi foram realizadas duas análises que consistem no seguinte:

1. tempo para a obtenção de um valor de % base húmida igual ou inferior a 47%;
2. valor da taxa média de secagem para o intervalo de 0 a 72h.

As experiências foram definidas como apresentado na tabela 6.1.

Experiências	Condições
i	20°C;50%;1.5m/s
ii	20°C;50%;3m/s
iii	20°C;60%;1.5m/s
iv	20°C;60%;3m/s

Tabela 6.1: Tabela da disposição das experiências

6.1.1. Primeira análise: tempo para a obtenção de um valor de % base húmida igual ou inferior a 47%

Na tabela 6.2 está representada a disposição ortogonal para o tempo.

Experiências	Φ	ν	$\Phi \times \nu$	t (h)
	1	2	3	
i	1	1	1	22,30
ii	1	2	2	24,38
iii	2	1	2	55,10
iv	2	2	1	38,15

Tabela 6.2: Disposição ortogonal $L_4 (2^3)$ pelo método de Taguchi para a 1ª análise

Onde

- $\Phi \rightarrow$ humidade relativa do ar;
- $\nu \rightarrow$ velocidade do ar;
- $\Phi \times \nu \rightarrow$ interacção entre a humidade e a velocidade do ar.

A resposta média para cada factor e para a interacção é dada por:

$$\overline{\Phi_1} = \frac{t_i + t_{ii}}{2} = 23,34, \quad \overline{\Phi_2} = \frac{t_{iii} + t_{iv}}{2} = 46,625$$

$$\overline{\nu_1} = \frac{t_i + t_{iii}}{2} = 38,7, \quad \overline{\nu_2} = \frac{t_{ii} + t_{iv}}{2} = 31,265$$

$$\overline{(\phi \times \nu)_1} = \frac{t_i + t_{iv}}{2} = 30,225, \quad \overline{(\phi \times \nu)_2} = \frac{t_{ii} + t_{iii}}{2} = 39,74$$

A tabela 6.3 contém os efeitos principais dos parâmetros em análise (humidade relativa, velocidade do ar e a interacção entre a humidade relativa e a velocidade do ar.

Os Efeitos principais são calculados obtendo a diferença entre os níveis (nível1-nível2). Os valores dos efeitos principais apresentados na tabela são valores absolutos.

Pela análise da tabela o efeito principal da humidade relativa é o mais forte (23,285), sendo que o efeito da velocidade e da interacção entre ambos é mais ou menos idêntico pois os valores estão muito próximos (7,435 e 9,515), respectivamente.

	$\bar{\Phi}$	$\bar{\nu}$	$\overline{(\Phi \times \nu)}$
Nível1	23,34	38,7	30,225
Nível2	46,625	31,265	39,74
Efeitos principais	23,285	7,435	9,515

Tabela 6.3: Tabela de respostas

Através da tabela 6.3, verifica-se que o aumento da velocidade de secagem leva a uma diminuição do tempo de secagem e, pelo contrário, um aumento da humidade relativa leva a que o tempo de secagem aumente.

6.1.2. Segunda análise: valor da taxa média de secagem para o intervalo de 0 a 72 horas

Na tabela 6.4 está representada a matriz ortogonal com a respectiva resposta $(m_i / m_{t=72h}) / 72$ [g/h].

	Φ	ν	$\Phi \times \nu$	
Experiências	1	2	3	$(m_i/m_{t=72h})/72$
i	1	1	1	0,40
ii	1	2	2	0,225
iii	2	1	2	0,15
iv	2	2	1	0,269

Tabela 6.4: Disposição ortogonal $L_4 (2^3)$ pelo método de Taguchi para a 2ª análise

Após a construção da tabela 6.5 observa-se que o efeito da humidade relativa (0,104) é mais forte do que o efeito da velocidade (0,028). O efeito da interacção entre a velocidade e a humidade relativa não é de se desprezar pois o seu valor (0,147) é o mais elevado dos três efeitos principais.

	$\bar{\Phi}$	\bar{v}	$\overline{(\Phi \times v)}$
Nível1	0,313	0,275	0,335
Nível2	0,209	0,247	0,188
Efeitos principais	0,104	0,028	0,147

Tabela 6.5: Tabela de respostas

Através da tabela 6.5 verifica-se que a taxa de secagem diminui (valor do nível2 é menor que o valor do nível1) quando a humidade relativa e a velocidade aumentam, embora essa diminuição seja mais significativa quando existe um aumento da humidade relativa do ar.

Após o estudo realizado através do método de Taguchi com a finalidade de verificar qual o parâmetro com maior importância na secagem do bacalhau, verificou-se que o parâmetro com maior relevância na secagem deste produto é a humidade relativa do ar. Um aumento da humidade relativa do ar implica que a taxa de secagem diminua provocando um aumento no tempo de secagem do bacalhau, respectivamente.

As curvas de secagem têm todas a mesma tendência, apresentando uma inclinação inicial e na parte final do tempo de secagem apresentam uma zona aproximadamente constante.

Os tempos para as amostras perderem 5,10,15,20 e 25% da massa inicial, são diferentes entre as experiências. Isto ocorre devido às experiências terem sido realizadas com diferentes condições de secagem. Quanto maior a humidade relativa mais demorada é a perda de massa da amostra (exp.7 e 8 e exp.5 e 6). Nas restantes experiências o referido anteriormente não se verifica totalmente, pois a secagem foi influenciada pela água presente na zona de condensação da estação de secagem.

O bacalhau é um peixe que vive em águas frias (2-10°C). Depois de capturado passa por vários processos: escala, salga e secagem. No processo de escala procede-se à degola e limpeza das tripas do bacalhau. Já sem cabeça e vísceras, o peixe é lavado e segue para uma máquina de escalar, que o espalma retirando dois terços da espinha central. De seguida é colocado em recipientes contendo sal, permanecendo aí cerca de sete dias semi-submerso pela água do próprio bacalhau. Por fim, leva-se o bacalhau para a estufa para secar.

O método mais rápido para a secagem do bacalhau é a secagem artificial que tem uma duração de cerca de 72h. A secagem natural tem uma duração de cerca de 10 a 15 semanas. Nas estufas as variáveis, velocidade e humidade relativa do ar, também chamadas de condições termodinâmicas de secagem, alguns autores recomendam uma temperatura entre 17 e 20°C, humidade relativa entre 45 e 55% e velocidade do ar 1 a 3 m/s no interior da estufa.

A secagem artificial é realizada em estufas devidamente equipadas para o efeito. Uma estufa contém no seu interior desumidificador/arrefecedor, um evaporador (tem a função de retirar o calor do interior da estufa), um condensador (para aquecer o interior da estufa até à temperatura desejada) e ventiladores (forçam a passagem do ar através dos tabuleiros).

O bacalhau para ser comercializado tem que cumprir as normativas legais ditadas no Decreto-Lei n.º 25/2005 de 28 de Janeiro. O bacalhau salgado seco no que diz respeito à humidade tem que conter um valor menor ou igual a 47% e no que diz respeito ao sal, tem que ter no mínimo 16%.

A secagem do bacalhau deve ser objecto de estudos mais aprofundados de modo a verificar quais os parâmetros mais relevantes a ter em conta na secagem deste tipo de produto.

Constata-se que os trabalhos existentes sobre a cinética da secagem do bacalhau são em número muito reduzido.

6.2. Análise da humidade de equilíbrio

→ Amostras sem forma

A humidade de equilíbrio depende não só das condições de secagem (humidade relativa e temperatura do ar) mas também do grau de exposição da superfície da amostra.

A humidade de equilíbrio aumenta com o aumento da humidade relativa do ar. Isto não se verificou com a amostra colocada a 60% de humidade relativa, pois esta poderá ter sido alterada devido ao longo período de contacto com o sal presente na superfície do bacalhau.



→ Amostras com formas geométricas

As esferas atingiram humidades de equilíbrio inferiores às dos cubos pois ao dar a forma de esfera às amostras, era impossível “compactar” a carne do bacalhau de modo a ficar com a compactação natural. Isto influenciou a evaporação da água das amostras.

Com a realização da experiência IX (40°C) verifica-se que a temperatura tem influência na obtenção da humidade de equilíbrio. O aumento de temperatura provoca uma diminuição da humidade de equilíbrio.



7. Sugestões para futuros trabalhos

O método de Taguchi é um método que para ser consistente e fiável implica a realização de um número elevado de experiências. Por este motivo devem-se realizar um número significativo de experiências, variando todos os parâmetros de secagem.

A estação de secagem apresenta pequenas infiltrações de ar exterior à conduta da estação de secagem, o que pode influenciar a secagem caso a humidade do ar exterior seja superior ao parâmetro desejado. Para evitar esta ocorrência deve-se isolar os locais onde possam existir infiltrações de ar, de modo a não influenciar a secagem da amostra.

Os dados recebidos através da balança devem ser tratados de modo a eliminar a variação da massa. Para isso deve-se colocar um filtro no programa da recepção dos dados de modo a retirar o valor da massa sem qualquer variação.

Quando o tempo de secagem definido termina, o ventilador que controla a velocidade do ar continua ligado até que o utilizador desligue a máquina manualmente. Para evitar que o funcionamento do ventilador influencie a massa da amostra, deve-se alterar o programa de controlo da máquina de modo a desligar o ventilador ao mesmo tempo que os outros componentes da estação de secagem se desligam.

As experiências realizadas na câmara higrométrica estiveram sujeitas apenas a condições de temperatura e de humidade relativa sendo que apenas se relacionou a influência da temperatura e da humidade relativa na determinação das humidades de equilíbrio. Para fazer um estudo mais completo de todos os parâmetros de secagem, é necessário fazer um programa para a câmara higrométrica de modo a fazer o controlo de todos os parâmetros de secagem.



Referências

- [1]<http://www.qca.pt/publicacoes/download/mare.pdf> (acedido em 30/04/08);
- [2]Entrevista realizada na Associação de Industriais de Bacalhau (AIB), Gafanha da Nazaré, ao Sr. Secretário-geral, Eng. Paulo Mónica, 18/11/2008;
- [3]<http://www.agroportal.pt/x/agronoticias/2006/11/19b.htm> (acedido em 25/11/08);
- [4]http://jn.sapo.pt/PaginaInicial/Interior.aspx?content_id=527867 (acedido em 25/11/08);
- [5]http://correiogourmand.com.br/produtos_glossario_alimentos_carnes_pescados_peixe_bacalhau_02.htm (acedido em 25/11/08);
- [6]http://correiogourmand.com.br/info_glossario_produtos_alimentos_carnes_pescados_peixe_bacalhau.htm (acedido em 25/09/08);
- [7]http://solegelo.blogspot.com/2007_06_01_archive.html (acedido em 25/11/0);
- [8]<http://www.grupeixe.pt/processo.html> (acedido em 25/11/08);
- [9]Jain,Dilip; Pathare,Pankaj B., *Study the drying kinetics of open sun drying of fish*, Journal of Food Engineering 78 (2007) 1315–1319;
- [10]<http://www.fao.org/docrep/field/003/AB486P/AB486P07.htm#ch7.1.24> (acedido em 16-03-08);
- [11]<http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt3691-6.html> (acedido em 5-12-08);
- [12]Duarte, Fernando Chagas, *A Indústria do Bacalhau No Início do Século XXI*, Publicado na revista Tecnipeixe nº 7, Janeiro/Fevereiro de 2002;
- [13]<http://www.dag.uem.br/prof/ptmpintro/material/1b/secagem.pdf> (acedido em 23/02/08);
- [14]<http://www.agroportal.pt/x/agronoticias/2006/10/23b.htm> (acedido em 10/12/08);
- [15]Lé, Flávio J.E., *Estudo Conceptual de Estufas para a Secagem de Bacalhau*, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Julho, 2004;
- [16]Diário da República - I SÉRIE-A, Nº. 20 — 28 de Janeiro de 2005;
- [17]Brochura publicada pela Associação Industriais Bacalhau, Gafanha Nazaré, Aveiro;
- [18]<http://forum.autohoje.com/showthread.php?t=38423> (acedido em 15/10/08);
- [19]Andrés,Ana; Rodríguez-Barona,Senyder;Barat,Jose M.; Fito,Pedro,*Salted cod manufacturing: influence of salting procedure on process yield and product characteristics*, Journal of Food Engineering 69 (2005) 467–471;
- [20]Carvalho, Carlos M.F., *Determinação Experimental da Cinética de Secagem de um Material Biológico*, Universidade de Aveiro, Portugal, 2007;
- [21]Prachayawarakorn,Somkiat;Soponronnarit,Somchart;Wetchacama,Somboon;Jaisut,Donrudee, *Desorption Isotherms And Drying Characteristics of Shrimp In Superheated Steam And Hot Air-Drying Technology*, 20(3), 669–684(2002);
- [22]Djendoubia,Nadia;Boudhriouaa,Nourhène;Bonazzib,Catherine;Kechaoua,Nabil, *Drying of sardine muscles: Experimental and mathematical investigations*, food and bioproducts processing, 2008;
- [23]Bellagha,S.; Sahli,A.; Farhat,A.; Kechaou,N.; Glenza,A., *Studies on salting and drying of sardine (Sardinella aurita): Experimental kinetics and Modeling*, Journal of Food Engineering 78 (2007) 947–952;



- [24]Manual TIRAclima, TIRAtemp standard chambers;
- [25]C Series Top Pan Balances-User Manual;
- [26]Silva, Luís M.F., *Controlo da Estação de Secagem A575*, Projecto Engenharia Mecânica-relatório Síntese, 20 Junho, 2005;
- [27]Yuin WU. 1986., *Orthogonal Arrays and Linear Graps*, Dearborn, Michigan: American Supplier Institute;
- [28]Ross, Phillip J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Ortogonal Experiments*, Parameter and Tolerance Design, McGraw – Hill, Inc., 1988;
- [29]Ross, Phillip J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Functions Orthogonal Experiments*, Parameter and Tolerance Design, Second Edition, McGraw-Hill, cop.1996;
- [30]Bellagha, S.;Amani, E., Farhat, A., Kechaou, N., *Drying kinetics and characteristic drying curve of lightly salted sardine (sardinella aurita)*, Drying Technology, 20 (7), (2002), 1527-1538.



Anexos



Anexo 1 - Especificações técnicas dos equipamentos usados

Estufa

A estufa da marca P Selecta apresenta as seguintes características:

- Botão on/off;
- Botão de controlo da temperatura;
- Uma porta de abertura fácil;
- Temperatura máxima: 250°C.

Câmara higrométrica

A câmara higrométrica é do modelo TCC 4034.

Especificações técnicas:

- Volume interno (l): 336;
- Variação da temperatura (°C): -40 a 180;
- Exactidão: 0,25...0,3;
- Variação da humidade relativa (temperatura de 5°C-95°C) (%): 10...98;
- Exactidão da humidade relativa: 1%...3%.

Estação de secagem A575

Especificações técnicas da unidade

- Caudal de ar: $0,13\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (máximo);
- Potência eléctrica do pré-aquecedor: 2X1 kW;



- Potência térmica do arrefecedor/desumidificador: 2 kW (aproximadamente);
- Potência eléctrica do re-aquecedor: 2X0,5 kW;
- Potência eléctrica do ventilador: 120 W;
- Potência eléctrica da caldeira de vapor: 1X1 kW + 2X2 kW;
- Unidade de refrigeração: opera com R134a.

Balança digital

A balança é do Modelo CC22 e tem as seguintes especificações:

- Capacidade: 2000 ± 0.01 g.

Condições de operação

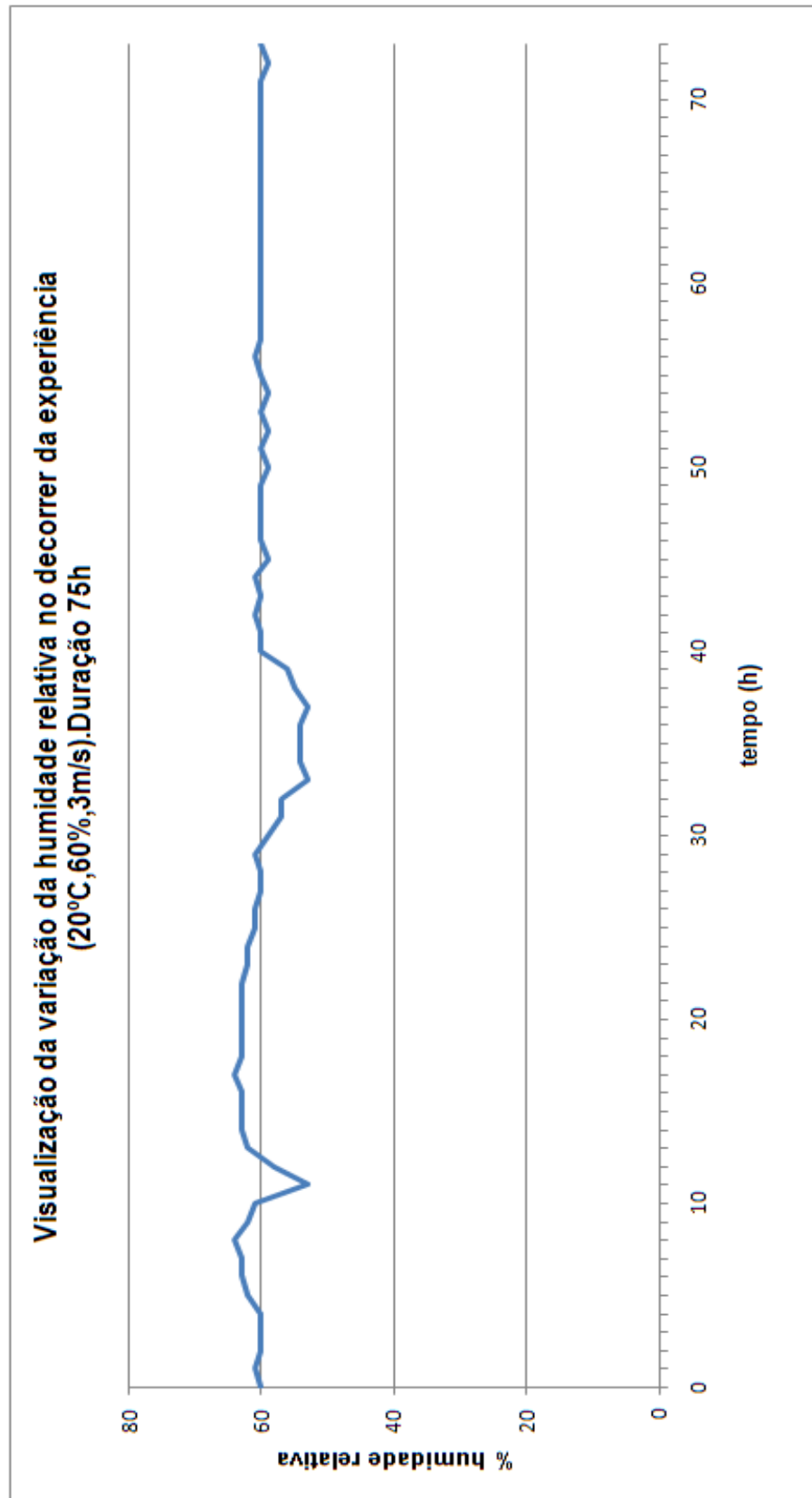
- Humidade: 0% a 80% HR;
- Temperatura em funcionamento: 0°C a 40°C;
- Temperatura de armazenamento: -20°C a 60°C;
- Temperatura em standby: -10°C a 50°C



Anexo 2 – Representação da variação da humidade relativa em função do tempo de secagem

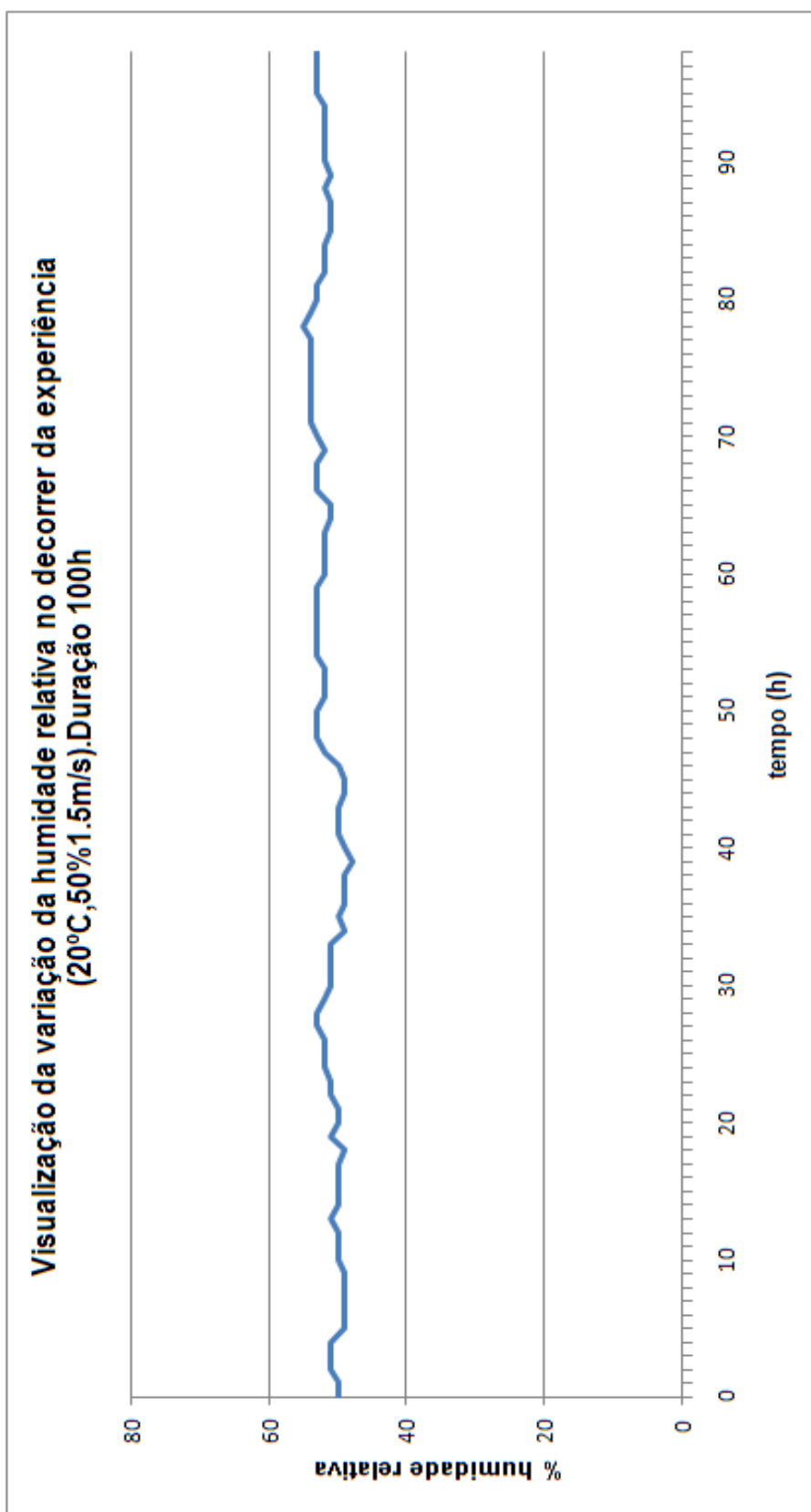


Visualização da humidade relativa em função do tempo da experiência III



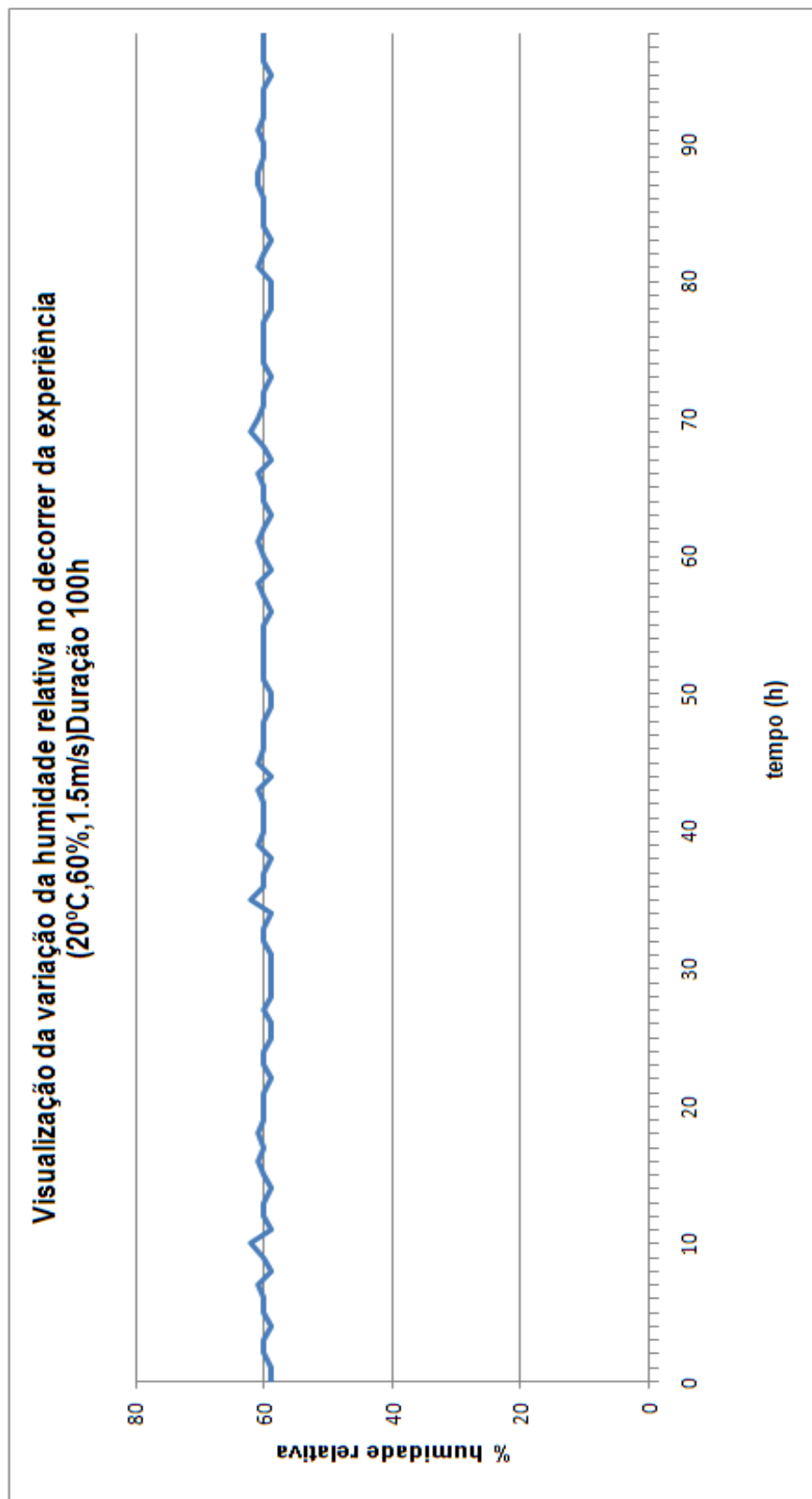


Visualização da humidade relativa em função do tempo da experiência V





Visualização da humidade relativa em função do tempo da experiência VI





Visualização da humidade relativa em função do tempo da experiência VIII

